

Aus der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. W. Reith

Räumliche Repräsentationen der Zahlenverarbeitung im Kindesalter

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Humanmedizin
der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2015

vorgelegt von:

Sonja Manuela Kreis

geb. am: 16.05.1984 in Fürth/Bay

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	1
1.1	Deutsche Zusammenfassung	1
1.2	Abstract	2
2	EINLEITUNG	3
2.1	Modelle der räumlichen und numerischen Verarbeitung	4
2.1.1	Mentale Rotation	6
2.1.1.1	Mentale Rotation als Modell der räumlichen Verarbeitung	6
2.1.1.2	Kortikale Aktivierungsmuster der Mentalen Rotation	8
2.1.1.3	Mentale Rotation und Arbeitsgedächtnisfunktion	14
2.1.1.4	Geschlechtseffekte der Mentalen Rotation	17
2.1.2	Verarbeitung numerischer Information	19
2.1.2.1	Modell der numerischen Verarbeitung - Triple-Code Modell	19
2.1.2.2	Effekte der Größenrepräsentation	23
2.1.2.3	Pathophysiologische Zusammenhänge dissoziierte Systeme der Zahlenverarbeitung stützend	25
2.1.2.4	Spezielle Aspekte der Zahlenverarbeitung im Kindesalter	26
2.1.2.5	Verarbeitung mehrstelliger Zahlen	28
2.1.2.6	Arbeitsgedächtnisfunktion und Zahlenverarbeitung	31
2.1.2.7	Kortikale Aktivierungsmuster der Zahlenverarbeitung	33
2.1.2.8	Geschlechtseffekte der Zahlenverarbeitung	37
2.2	Hypothese	38
3	MATERIAL UND METHODE	39
3.1	fMRT-Messung	39
3.1.1	Mentale Rotation	39
3.1.2	Zahlenverarbeitung	40
3.1.3	Aufbau der Experimentalphasen	41
3.1.4	Zusatzmessungen im Kernspin	42
3.1.5	Versuchsaufbau	42
3.1.6	Statistik und Aufbereitung der Daten	43
3.2	Versuchspersonen	45
3.3	Erhebung von Kovariaten	46

4	ERGEBNISSE	47
4.1	Behaviorale Ergebnisse	47
4.1.1	Mentale Rotation	47
4.1.2	Zahlenverarbeitung	49
4.1.3	Ergebnisse durch die Erhebung der Kovariaten	51
4.2	fMRT-Ergebnisse	59
4.2.1	Mentale Rotation	59
4.2.2	Zahlenverarbeitung	66
4.2.3	Gemeinsame Betrachtung von Zahlenverarbeitung und Mentaler Rotation	76
5	DISKUSSION	85
6	LITERATURVERZEICHNIS	93
7	PUBLIKATION	103
8	ANHANG	104

Abkürzungsverzeichnis:

IPS	Intraparietalsulcus
HIPS	horizontaler Intraparietalsulcus
IPL/IPC	inferiorer Parietallappen/Parietalkortex
SPL	superiorer Parietallappen
PMd	dorsaler prämotorischer Kortex
PMv	ventraler prämotorischer Kortex
BA	Brodmannareal
SMA	supplementärmotorisches Areal

1 Zusammenfassung

1.1 Deutsche Zusammenfassung

In vorliegender Studie wird eine räumliche Repräsentation - die Zahlenverarbeitung im Kindesalter betreffend - untersucht. Hierbei wurde ein funktionelles MRT-Paradigma zur Evaluierung notwendiger neuronaler Verarbeitungsnetzwerke herangezogen. Insgesamt nahmen 32 gesunde Probanden mit einem Durchschnittsalter von 11,62 Jahren an den funktionellen Messungen teil. Für die Darstellung der räumlichen Verarbeitungskomponente wurde eine mentale Rotationsaufgabe verwendet. Die Verarbeitung numerischer Größen wurde mit Hilfe einer Zahleneinordnungsaufgabe überprüft. Dabei wurde postuliert, dass sich die jeweiligen neuronalen Netzwerke überschneiden. Dies konnte durch eine Conjunction-Analyse bestätigt werden, in der gezeigt wurde, dass sich die Schnittstellen zwischen räumlicher und numerischer Kognition beidseits parietal, den Intraparietalsulcus miteinbeziehend, befinden sowie im rechten dorsalen prämotorischen Kortex. Dies spiegelt die räumliche Komponente der semantischen Größenrepräsentation von Zahlen wider. Durch die miterhobenen behavioralen Daten konnten spezielle Effekte der Zahlenverarbeitung im zweistelligen Bereich gezeigt werden. Hier kam es zu einem spezifischen Performanzabfall. Auf funktioneller Seite war hierbei insbesondere der linke Gyrus angularis sowie der linke prämotorische Kortex aktiv, was eine u.a. betont linguistische Verarbeitung zweistelliger Zahlen impliziert. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Verarbeitung zweistelliger Zahlen eine zusätzliche räumliche Aufgabe beinhaltet die in der mentalen Ziffernumkehr der deutschen zweistelligen Zahlen begründet sein könnte. Diese hat sich durch eine deutliche Aktivierung des linken IPS in Überlappung mit der mentalen Rotation gezeigt. Ein signifikanter Geschlechtseffekt der Aufgaben konnte weder funktionell noch behavioral gefunden werden.

1.2 Abstract

The study evaluates the spatial representations concerning number processing in childhood. A functional MRI-paradigm was used to examine the involved functional neural networks. 32 healthy subjects with a mean age of 11,62 years participated the functional MRI scans. A mental rotation task was used to examine the spatial neuronal network. The processing of numerical information was evaluated by using a classification task concerning number magnitude. It was proposed that those two distinct neuronal networks show overlapping patterns. This could be confirmed by conducting a conjunction-analysis, where overlapping activations were located bilaterally in the parietal lobes including the intraparietal sulcus and in the right dorsal premotor cortex. This pattern goes in line with a spatial correlate for the semantic magnitude representation in number processing. Through the behavioral data a special effect with a decreased performance concerning the processing of two-digit numbers was observed. On the functional side there was a specific involvement of the left angular gyrus and the left premotor cortex implicating i.a. a linguistic dominant processing of two-digit numbers. Additionally a strong spatial activation was found in the left intraparietal sulcus, which might be conducted by the mental rotation of the inverted digits in German two-digit numbers. Concerning the functional and the behavioral data no significant gender-differences were found.

2 Einleitung

Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit der Aufklärung notwendiger Verarbeitungsprozesse, die dem Umgang mit Zahlen zugrundeliegen (Piazza *et al.* 2007, Shuman & Kanwisher 2004, Pinel *et al.* 2001, Dehaene 1992, Dehaene & Changeux 1993). Ebenfalls ist in diesem Zusammenhang schon früh festgestellt worden, dass die Verarbeitung numerischer Information eng mit dem räumlichen Denken verknüpft sein muss (Dehaene *et al.* 1993, Kaufmann *et al.* 2008, Nuerk *et al.* 2005b, Gevers *et al.* 2003).

Modelle, in denen Zahlen einer räumlichen Position entsprechen, durchziehen seit jeher das mathematische Denken. Angefangen bei den elementarsten Aspekten der Mathematik wie z.B. der Einführung von Maßeinheiten bis hin zum Konzept des Zahlenstrahls, des kartesischen Koordinatensystems und der Rechnung mit Vektoren.

Die neurowissenschaftliche Betrachtungsweise ist in diesem Zusammenhang als eine Annäherung anzusehen, die u.a. in der Geschichte der Mathematik tief verwurzelte Verbindung zwischen Raum und Zahl auf kognitiver Ebene zu beleuchten.

Klinische Erkenntnisse, die auf funktionelle Einheiten des mathematischen Denkens hinweisen ergaben sich bereits früh durch pathophysiologische Zusammenhänge an traumatisch oder intrinsisch geschädigten Gehirnen; wie es z.B. beim Gerstmann-Syndrom der Fall ist (Pedersen 1946).

Die Möglichkeiten der funktionellen Bildgebung haben dazu geführt, grundlegende neuronale Korrelate der Verarbeitung von Zahlen weiter offenzulegen. Hierbei sind Hirnareale involviert, die nicht nur spezifisch an der Verarbeitung numerischer Information teilhaben, sondern auch eine entscheidende Rolle visuell-räumliche Aufgaben betreffend haben. So werden funktionelle Netzwerke beansprucht, die gleichzeitig u.a. auch bei der mentalen Rotation aktiv sind (Dehaene *et al.* 2003, Thompson *et al.* 2013).

2.1 Modelle der numerischen und räumlichen Verarbeitung

Räumliches Denken und Zahlenverarbeitung

Die Verarbeitung räumlicher Information ist eine grundlegende Fähigkeit, die es Lebewesen erst möglich macht, in ihrer Umwelt adäquat zu agieren. Die Manipulation und das Verständnis für räumliche Information beinhaltet eine Vielzahl komplexer Abläufe, die im Verlauf der menschlichen Entwicklung zum Großteil erst erlernt werden müssen. Ähnlich der basalen Fähigkeiten des Kindes bezüglich des numerischen Denkens, nämlich im Sinne einer rudimentären Größendiskriminierung, ist auch beim räumlichen Denken von basalen Fähigkeiten bereits im frühen Kindesalter auszugehen. Ein Grundbaustein für die Entwicklung eines räumlichen Verständnisses liegt hierbei unter anderem in der sensomotorischen Wahrnehmung der Umgebung. Wodurch nicht zuletzt die Bewusstwerdung des eigenen Daseins als Individuum im Raum möglich wird. Dies ist nicht mit der philosophischen Betrachtung des speziell menschlichen Bewusstseins gleichzusetzen, sondern vielmehr Ausdruck einer grundlegenden Fähigkeit höherer Lebewesen, komplexere räumliche Manipulationen durchzuführen. Ein weiterer Schritt in der Entwicklung ist die Betrachtung des Raumes von einem anderen Standpunkt aus. Also die Durchführung eines Perspektivenwechsels. Hierbei spielt die Inkenntnissnahme räumlicher Beziehungen eine entscheidende Rolle. Die Unveränderlichkeit von Objekten unabhängig ihrer Position oder Ausrichtung. In diesem Stadium muss nicht mehr angefasst oder ausprobiert werden, um gewisse Zusammenhänge zu verstehen. Sie werden rein mental erfasst. Die Erkenntnis über die relationalen Zusammenhänge unserer Umwelt in Referenz zu uns selbst, spielt somit eine entscheidende Rolle. Diese Erkenntnis ist jedoch ein dynamischer und plastischer Entwicklungsprozess und unterliegt somit einer Vielzahl äußerer Einflussfaktoren. Somit hängt diese basale Fähigkeit wesentlich damit zusammen, wie wir Dinge erlernen, und wie wir uns selbst in Beziehung zu unserer Umwelt setzen (Eliot 2002).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Kernaspekt räumlicher Intelligenz um einiges komplexer ist als es durch die Annahme eines bildhaften Gedächtnisses für Objekte verschiedenster Art zum Ausdruck kommt.

Die Fähigkeit zur imaginären bildhaften Manipulation unserer Umwelt kann sicherlich äußerst hilfreich sein. Sie stellt jedoch vermutlich nur einen Teilaspekt der räumlichen Intelligenz dar. Hierbei ist hervorzuheben, dass diese sich in der Fähigkeit äußert, Relationen der uns umgebenden Welt zu verinnerlichen und somit als Grundlage dafür fungiert, Beziehungen

wie die Distanz von Objekten oder deren direktionale Anordnung in ein weitreichenderes, in sich verwobenes Wissenssystem über unsere Umwelt münden zu lassen. Hierdurch dient sie auch der Erkennung von wiederkehrenden Mustern und Zusammenhängen. Womit sie in den Prozess des Ableitens von logischen Schlussfolgerungen basierend auf einem konstruierten Wissenssystem involviert ist. Sozusagen in die Imagination von Dingen, die bis dahin noch nicht gesehen wurden oder da waren (Eliot 2002). Dieser Kernaspekt räumlicher Intelligenz spielt offensichtlich auch bei Schlussfolgerungen im Zahlenraum bzw. dem mathematischen Denken eine wichtige Rolle.

2.1.1 Mentale Rotation

2.1.1.1 Mentale Rotation als Modell der räumlichen Verarbeitung

Mentale Rotation kann als kognitive Manipulation räumlicher Gegebenheiten angesehen werden. Diese Fähigkeit erwies sich, wie bereits erwähnt, u.a. dem Menschen evolutionär gesehen als äußerst hilfreich, um sich in seiner Umgebung zurechtzufinden. Sowohl in der direkten unmittelbaren und greifbaren Umgebung als auch bezogen auf ein weiträumigeres Gebiet (z.B. das Jagdgebiet), da die Möglichkeit der mentalen Manipulation sowie des Perspektivenwechsels sowohl Aufschluss über die eigene Position im Raum geben kann, als auch über die Ausrichtung eines anderen Objektes. In diesen mentalen Prozess sind verschiedene kognitive Abläufe involviert.

Mentale Rotation wird weitreichend als etabliertes Untersuchungsverfahren für räumliche Denkprozesse verwendet. Bis dahin ging man davon aus, dass tatsächlich die mentale Rotation eines dargebotenen Stimulus erfolgt. Beweisend hierfür galt der sogenannte „Mentale Rotationseffekt“ (s.u.). Dieser drückt sich dadurch aus, dass die Zeit bis zur Antwortgabe durch den Probanden mit zunehmender Winkeldisparität zunimmt (s.u.). Was den Schluss einer bildhaften Rotation des Stimulus nahelegt. Es gibt aber auch andere, neuere Ansätze die nahelegen wollen, dass es hauptsächlich um eine Art Manipulation der extrahierten relevanten räumlichen Information geht. Die Informationsextraktion also eine entscheidende Rolle einnimmt, und der Prozess, der zur Ergebnisfindung führt nicht einer rein visuellen Imagination entspricht.

Der eigentliche Prozess der mentalen Rotation, so wie wir ihn heute verstehen, wurde erstmals von Shepard und Metzler 1971 (Shepard & Metzler 1971) im Rahmen behavioraler Studien aufgedeckt. Hierbei kam eine Aufgabe zur Anwendung, die bis heute in vielfach abgewandelter Form verwendet wird, um den Prozess der mentalen Rotation genauer zu untersuchen.

Grundlegender Aspekt der Aufgabe ist immer der Vergleich zweier Stimuli. Diese können gleichzeitig, also nebeneinander, dargeboten werden oder einzeln in sequenzieller Abfolge. Die Stimuli unterscheiden sich hierbei in ihrer räumlichen Orientierung, abgesehen von einer eventuell vorhandenen Kontrollbedingung. Die Größe des Winkels, in dem sich die Stimuli in ihrer Ausrichtung unterscheiden, ist ein Maß für die zu vollführende mentale Rotation. Der Vergleich erfolgt hinsichtlich einer Aussage über die Kongruenz bzw. die Spiegelbildlichkeit

der asymmetrischen Stimuli. Wenn eine Deckungsgleichheit möglich ist, dann stimmen die Stimuli miteinander überein (Liesefeld 2012).

Um zu unterscheiden, ob die beiden dargestellten Buchstaben F gleich oder spiegelbildlich zueinander sind, muss eine mentale Rotation durchgeführt werden.

A



B

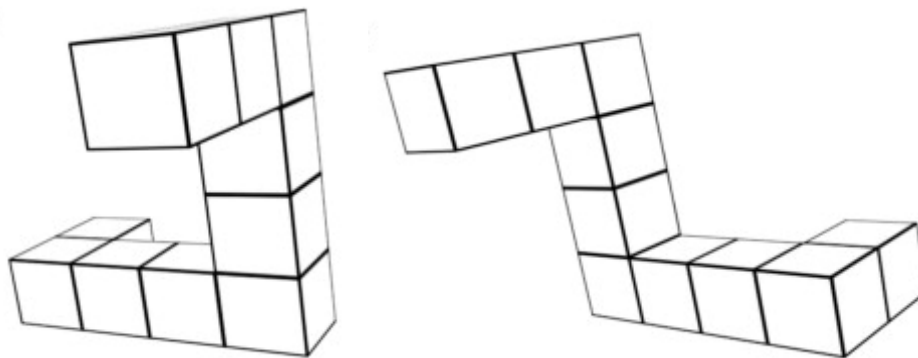


Abb. 1 : A) Alphanumerischer Stimulus B) Figuren vom Shepard und Metzler Typ, übernommen aus der Stimulusbibliothek von Michael Peters et al. 2008 (Peters & Battista 2008)

Das Ergebnis, welches bei dieser Art von Aufgabe initial zur Annahme der Durchführung einer mentalen Rotation geführt hat, war die nahezu lineare Abhängigkeit der Antwortgeschwindigkeiten von den zugrundeliegenden Winkeldisparitäten (Shepard und Cooper 1982). Das bedeutet, je größer der Winkel, desto mehr muss „gedreht“ werden, und damit steigt die in Anspruch genommene Zeit für die Aufgabe. Dieser Zusammenhang wird auch als „mentaler Rotationseffekt“ bezeichnet. Dieser war auch Grundlage für die Annahme, dass eine ana-

loge räumliche Repräsentation im Bezug zur Außenwelt stattfindet. Schritte, die der mentalen Rotationsaufgabe als zugrundeliegend angenommen werden, sind im Folgenden aufgeführt (Liesefeld 2012):

- Zunächst erfolgt die Encodierung des Original- bzw. auch des Vergleichsstimulus (bei gleichzeitiger Darbietung).
- Die Wahrnehmung der Winkeldisparität, also des Grades des Orientierungsunterschiedes.
- Die eigentliche mentale Rotation.
- Der Vergleich der mental nun gleich ausgerichteten Stimuli.
- Die Antwortselektion.

2.1.1.2 Kortikale Aktivierungsmuster der Mentalen Rotation

Wie bereits erwähnt, wurden zur Untersuchung der mentalen Rotation bis dahin in vielen vorangegangenen Studien Aufgaben verwendet, deren Kernaspekt zwar im Wesentlichen der gleiche ist, die Umsetzung jedoch häufig differiert. Dies scheint ein Grund dafür zu sein, dass bis dahin in nahezu allen Arealen des Großhirnes und auch Kleinhirnes eine Aktivität gefunden werden konnte, die der mentalen Rotation zugeordnet wurde. Laut einer Meta-Analyse von J. Zacks 2008 (Zacks 2008) sind jedoch über alle diese vielschichtigen Daten hinweg in verlässlicher Weise einige spezifische Hirnareale aktiv. Genauer wird hier von einer Aktivierung insbesondere frontaler prämotorischer Areale sowie des superioren Parietalkortex und des Intraparietalsulcus beidseits berichtet. Die Aktivität ist grundsätzlich bilateral vorhanden, wobei bezüglich des Parietallappens eine Tendenz zur rechtshemisphärischen Dominanz und den frontalen Kortex betreffend eine linkshemisphärische Betonung beobachtet werden konnte.

Mentale Rotation kann als analoge räumliche Repräsentation der extern dargebotenen Stimuli angesehen werden (Shepard & Cooper 1982). Experimentelle Ergebnisse, die eine analoge Repräsentation stützen könnten, sind die Folgenden (Zacks 2008). Zum einen sollten die Hirnareale, die aktiviert werden einer räumlichen inneren Ordnung unterliegen (s.u.). Und diese Areale sollten ihre Aktivität mit dem Betrag der erforderlichen Rotation verändern. Dies drückt sich behavioral durch den annähernd linearen Zusammenhang zwischen Winkeldisparität und Antwortgeschwindigkeit aus.

Die Frage nach motorischen Simulationen kommt u.a. durch Ergebnisse auf, in denen eine Aktivierung im posterioren Frontalkortex nachgewiesen wurde. Dieser ist wesentlich in die

Planung und Ausführung von motorischen Handlungen involviert (Zacks & Michelon 2005). Grundsätzlich muss hier jedoch eine Konfundierung der Ergebnisse mit den motorischen Handlungen, die für die Ausführung der experimentellen Anforderungen wie z.B. der Antwortgabe selbst notwendig sind, ausgeschlossen werden. Dementsprechend konnte auch eine Modulation der funktionellen Ergebnisse beobachtet werden, bei einer Studie die eine mentale Rotationsaufgabe mit Handstimuli durchgeführt hat und die Position der Hände der Probanden dabei variieren lies (Ionta *et al.* 2007).

Die für die mentale Rotation zu erwartenden spezifischen Aktivierungsmuster sind in der folgenden Abbildung (Abb. 2) dargestellt. Diese ist aus einer anderen Arbeit übernommen worden, die die genauen Repräsentationsmechanismen der mentalen Rotation zum Gegenstand hatte. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass der IPS, der inferiore und Teile des superioren Parietalkortex aktiviert sind sowie beidseits prämotorische Areale wie der PMd und SMA.

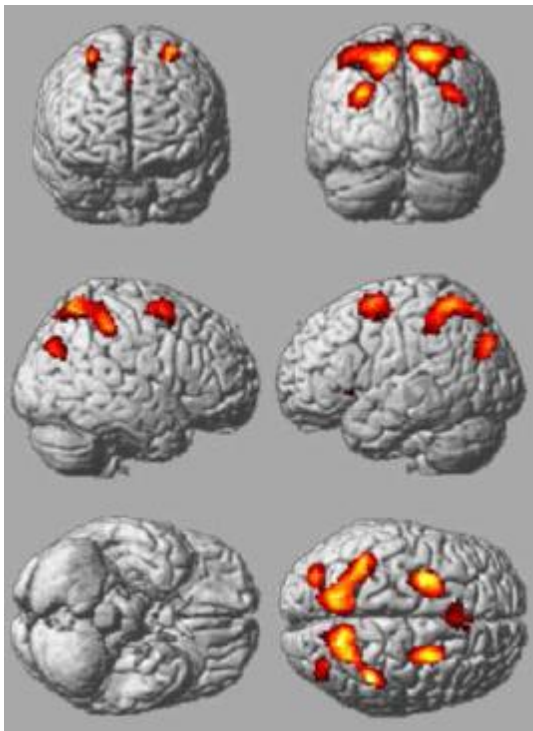


Abb. 2 : Rotationsspezifische Aktivierung: für den Kontrast Rotation>Retention; modifiziert nach Dr. René Liesefeld; Dissertation: The Representation in Mental Rotation-its content, timing, and neuronal source, Seite 151 (Liesefeld 2012)

Parietalkortex

Der Parietalkortex (insbesondere der posteriore Teil/BA7) sowie der Intraparietalsulcus sind in verlässlicher Weise während der mentalen Rotation aktiv (Podzebenko *et al.* 2005, Milivojevic *et al.* 2009, Harris & Miniussi 2003).

Die parietale Aktivierung ist grundsätzlich bilateral vorhanden. Der Parietalkortex ist Teil des dorsalen Verarbeitungsweges und gilt als neuronales Substrat für die räumliche Verarbeitung visueller Information. Er fungiert u.a. als Schnittstelle zwischen visueller Information und Propriozeption. Hierbei ist er insbesondere in die Prozessierung handlungsrelevanter räumlicher Information involviert (Milner & Goodale 2008). Insbesondere dem superioren Parietalkortex wird hierbei die Kodierung einer inneren räumlichen Landkarte zugeschrieben, welche zur Durchführung zielgerichteter Bewegungen notwendig ist (Zacks 2008). Der linke superiore Parietalkortex soll hierbei hauptsächlich für kategorische räumliche Relationen kodieren, wohingegen der rechte für koordinative metrische (kontinuierliche) räumliche Information fungiert (Trojano *et al.* 2002). Unter kategorischer Information ist hierbei z.B. die Lage eines Objektes in Relation zu einem anderen gemeint, ausgedrückt durch links/rechts oder oben/unten. Der koordinative Term beschreibt die quantitative Komponente der räumlichen Abbildung. In der Studie von Trojano *et al.* (Trojano *et al.* 2002) wurde zur Überprüfung dieser Komponente eine Aufgabe verwendet, bei der beurteilt werden sollte, ob die Zeiger einer Uhr einen Winkel zueinander bilden der jeweils größer oder kleiner als 60° ist. Die Studie von van der Ham *et al.* von 2009 stützt die eben beschriebene relative Lateralisierung von koordinativer und kategorischer Information im superioren Parietallappen (van der Ham *et al.* 2009). Wie bereits erwähnt, ist in einer Vielzahl von Studien bezüglich der mentalen Rotation eine Aktivität im superioren Parietalkortex und in den an ihn angrenzenden Arealen beschrieben worden. Hiemit ergibt sich eine Aktivierung im Intraparietalsulcus mit Ausdehnung bis in den transversalen Occipitalsulcus sowie die Brodmannareale 7, 19, 39 und 40. Grundsätzlich kann von einer wichtigen Rolle des superioren Parietallappens bezüglich visuell räumlicher Transformationen ausgegangen werden. Diese Annahme entspricht vorangegangenen neuropsychologischen Daten (Ratcliff 1979). Interessante funktionelle Aspekte ergeben sich u.a. insbesondere aus elektrophysiologischen Studien über Augenbewegungen und Greifbewegungen bei Affen (Andersen & Buneo 2002). Einige Zellen des superioren Parietalkortex repräsentierten bestimmte Orte, bezogen auf ein Augen-zentriertes Koordinatensystem. Diese Augen-zentrierten Antworten wurden durch die Körperposition des Affen moduliert und ermöglichten so zielgerichtete Bewegungen, auch wenn der Kopf eine andere Position einnahm

- also in einem Körper- bzw. weltzentrierten Referenzrahmen, was als innere räumliche Organisation betrachtet werden kann. Diese Ergebnisse können eine analoge Repräsentation der räumlichen Umwelt zumindest im Parietalkortex stützen. Dies gilt insbesondere bezogen auf transformationsspezifische Aufgaben.

Frontale Areale

Die oft beobachtete bilaterale Aktivierung motorischer und hier insbesondere prämotorischer Areale impliziert die Annahme, dass die mentale Rotation eng mit einer motorischen Simulation zusammenhängt, da der präzentrale Kortex in die Planung und Ausführung motorischer Handlungen involviert ist. Dies hat zur Annahme geführt, dass es zur Vorstellung einer Drehung des Objektes mit den eigenen Händen während der mentalen Rotation kommt. Aber auch wenn diese imaginäre manuelle Manipulation nicht stattfindet, sondern Probanden vorher trainiert wurden, sich eine externe Manipulation vorzustellen, sind prämotorische Areale zwar in geringerem Ausmaß, aber dennoch mit in den Prozess der mentalen Rotation involviert (Kosslyn *et al.* 2001). Dies impliziert, dass zwar motorische Strategien eine Rolle spielen, diese sich jedoch nicht unbedingt durch eine bewusste Vorstellung über eine manuelle Manipulation ergeben müssen.

Eine entscheidende Frage bezüglich der Aktivierung motorischer Areale in diesem Zusammenhang stellt sich im Hinblick ihrer Diskriminierung von tatsächlich durchgeführten motorischen Handlungen während der Aufgabe; z.B. die Antwortgabe mittels Tastendruck oder Augenbewegungen betreffend. Eine Aktivierung des primär motorischen Kortex, die bei einer willkürlichen motorischen Handlung vorhanden sein müsste, konnte für die mentale Rotation jedoch nicht eindeutig bestätigt werden. Bei der Betrachtung transformationsspezifischer Aktivierungsareale waren insgesamt keine primär motorischen Areale aktiv (Zacks 2008).

Die Aktivierung primär motorischer Areale sowie deren Lateralisierung differiert bezüglich spezifischer Testeigenschaften. Die Rotation von Händen als dargebotene Stimuli gegenüber abstrakten Stimuli führt zu einer stärkeren Aktivierung, insbesondere des linken Gyrus präzentralis (Kosslyn *et al.* 1998).

Die Linkslateralisierung kann als Ausdruck der Vorstellung einer Rotation mit der dominanten rechten Hand gelten. Warum aber der primär motorische Kortex hier involviert ist, ist weiterhin nicht völlig klar. Eine mögliche Erklärung könnte sich einfach durch das Betrachten oder Vergleichen von Handstimuli mit den eigenen Händen ergeben. Grundsätzlich kann

aber eine verstärkte Aktivierung präzentraler Areale, insbesondere durch die Verwendung von Handstimuli als Ausdruck einer Induktion von speziellen motorischen Strategien interpretiert werden (Liesefeld 2012). Ergebnisse, die diese Annahme stützen, beruhen auf einer Studie von Wraga et al. (Wraga *et al.* 2003). Hier wurde ein sequenzierter Versuchsaufbau gewählt, bei dem die teilnehmenden Probanden zunächst eine mentale Rotationsaufgabe entweder mit Handstimuli oder abstrakten Stimuli durchführen mussten. Im Anschluss daran haben alle eine mentale Rotationsaufgabe mit abstrakten Stimuli durchgeführt. Bei denen die initial „Hände“ rotiert hatten, war die Aktivität des präzentralen Kortex beidseits größer als bei der anderen Gruppe.

Die bereits erwähnte Studie von Kosslyn et al. 2001 (Kosslyn *et al.* 2001) hingegen hat zwar auch präzentrale Areale beschrieben, diese liegen jedoch eindeutig im prämotorischen Kortex (Zacks 2008). Besonderheit der Studie gegenüber den anderen war die ausschließliche Verwendung von abstrakten Stimuli. So muss zumindest in Erwägung gezogen werden, dass die Aktivierung primär motorischer Areale eine spezifische Eigenschaft der mentalen Rotation von Handstimuli ist - als Ausdruck einer Induktion spezieller motorischer Strategien.

Insgesamt machen es diese Ergebnisse wahrscheinlicher, dass es sich hierbei um Prozesse handelt, die sich zwar des neuronalen Substrates für räumlich orientierte Bewegungsabläufe bedienen, jedoch zum Zwecke abstrakterer kognitiver Leistungen. Betrachtet man Zacks Meta-Analyse von 2008 hinsichtlich transformationsspezifischer Kontraste, sind Teile der Brodmannareale 6 und 8 in signifikanter Weise aktiv. Unter ihnen subsummiert sich das prämotorische Areal eingeschlossen des supplementärmotorischen Kortex. Bei genauer Betrachtung der Koordinaten der Aktivierungsmaxima ist beidseits der dorsale prämotorische Kortex (PMd; Brodmannareal 6) aktiv.

Grundsätzlich können prämotorische Areale als gute Mediatoren für motorische Kontrolle und Simulationen angesehen werden. Der SMA und der PM (laterale prämotorische Kortex) haben neben projizierenden Bahnen zum primärmotorischen Kortex (M1) auch Verbindungen zum Myelon selbst, diese sind jedoch im M1 am dichtesten gepackt (Dum & Strick 2002). Ein wichtiger Aspekt prämotorischer Areale ergibt sich hinsichtlich ihrer sensomotorischen Integration, die zur Planung von Bewegungsabläufen eine entscheidende Rolle spielt.

Grundsätzlich gibt es einige Hinweise dafür, dass eine somatotope Gliederung des PM (ähnlich des M1) wie sie bereits beim Affen nachgewiesen wurde, auch beim Menschen vorhanden ist. Somit ergeben sich bezüglich vieler anderer Paradigmen, die lediglich die Imagination

oder Betrachtung von Bewegungsabläufen zum Inhalt haben, spezifische Aktivierungsmuster im PM, die mit bestimmten Körperteilen korreliert werden können (Buccino *et al.* 2001). Hier können diese spezifischen Aktivierungsmuster als Ausdruck verdeckter mentaler Bewegungsabläufe interpretiert werden, die auch aktiv wären bei der eigentlichen Ausführung der motorischen Handlung (Jeannerod 2001). Hier liegen insbesondere die Koordinaten für Augen-, Arm- und wenn auch weniger für Handbewegungen weiter medial als die für z.B. hauptsächlich Hand- und Fingerbewegungen oder Mundbewegungen und somit wieder im PMd. Aber eben gerade auch bei rein perzeptiven Aufgaben kommt es zu solch einer somatotop gegliederten Aktivierung. Wobei insbesondere dem PMd eine räumliche Aufmerksamkeitskomponente und dem weiter lateral gelegenen PMv eine objektbezogene zugeschrieben wird (Schubotz & Cramon 2003). Zusammengenommen können diese Ergebnisse stützen, dass der PM in die Imagination von Bewegungsabläufen des eigenen Körpers involviert ist, aber auch sensorische Informationen der Umwelt in Referenz zum eigenen Körper repräsentiert (Schubotz & Cramon 2003). Dementsprechend gilt die These, dass Teile des PM nicht nur Bewegungsabläufe koordinieren, sondern auch Kodierungsmuster für räumliche Zusammenhänge selbst beinhalten. Ob efferente oder auch afferente Abläufe als hauptsächlich zugrundeliegendes Substrat für diese Kodierung fungieren, ist nicht ganz klar (Schubotz & Cramon 2003). Auf jeden Fall werden hier Gegebenheiten der Umgebung als Referenzen für bestimmte Effektoren kodiert (Fogassi *et al.* 1996, Gentilucci *et al.* 1988). Somit wurde auch die These entwickelt, dass der PM in erster Linie motorische Ideen repräsentiert, die als Basis für räumliche Repräsentationen, das Verständnis von Handlungsabläufen und zur Objektkategorisierung dienen können (Fadiga *et al.* 2000). Es ist offensichtlich, dass es sich somit um ein neuronales Substrat für vielschichtige kognitive Leistungen handelt. Wobei es innerhalb des PM zu einer grundlegenden funktionellen Spaltung zwischen ventralen und dorsalen Anteilen kommt. Man nimmt an, dass der PMd für die Kodierung von modalitätenübergreifender Sequenzen - oder Bewegungsplanung dient. Wohingegen der PMv eher die „Oberflächeneigenschaften“ dieser Sequenzen erfasst. Somit kommt es zu einer verstärkten Aktivierung des PMd, wenn die Komplexität einer Sequenzabfolge sich erhöht, und andere Eigenschaften konstant beibehalten werden (Haslinger *et al.* 2002, Harrington *et al.* 2000).

In der Studie von Schubotz und Cramon von 2003 (Schubotz & Cramon 2003) wird weiterhin dargelegt, dass der rechte PMd in räumliche Aufgaben involviert ist, wohingegen der linke präferiert bei nicht-räumlichen Aufgaben aktiv ist. So konnte auch eine rechtsseitige Hemisphärendominanz das räumliche Arbeitsgedächtnis betreffend gefunden werden (Jonides

et al. 1993, Haxby *et al.* 1994). Dies gilt unter anderem auch für räumliche Aufmerksamkeitsprozesse generell (Gitelman *et al.* 1999). Grundsätzlich können diese Erkenntnisse unter dem Aspekt betrachtet werden, dass die rechte Hemisphäre auf der Wahrnehmungsebene in allumfassendere Informationsverarbeitungswege involviert ist als die linke (Hellige 1996). Eine linksseitige Dominanz konnte beim Erlernen neuer motorischer Bewegungsabläufe beobachtet werden, bei denen motorische Handlungsabfolgen koordiniert und geplant werden müssen. Wohingegen der rechte PMd in fortgeschrittenere Lernprozesse sowie der Beibehaltung einer bestimmten erlernten Bewegungsreihenfolge involviert ist. Die Aktivierung des rechten PMd hat hier bezüglich der Komplexität der Bewegungsabfolgen variiert, insbesondere deren Länge betreffend. Dies stützt die Storage-These, die besagt, dass komplexe Abfolgen mehr Arbeitsgedächtnis-Kapazität benötigen als einfache (Sadato *et al.* 1996). Derselbe Effekt konnte auch beim Erlernen nicht-motorischer Sequenzen auf der reinen Wahrnehmungsebene beobachtet werden (Schubotz & Cramon 2003).

2.1.1.3 Mentale Rotation und Arbeitsgedächtnisfunktion

Die Arbeitsgedächtnisfunktion wird allgemein als Leistung definiert, bei der es um das Halten und Abrufen einer Stimulusinformation geht. Grundsätzlich gibt es hier unterschiedliche Modellvorstellungen, die spezifische Aspekte des Eingangmediums sowie bestimmte Einflussfaktoren auf die Performanz miteinbeziehen. Das Halten der Information kann im Wesentlichen als Kurzzeitgedächtnisleistung aufgefasst werden, bei der sensorische Informationen für kurze Zeit gehalten werden können, ehe sie wieder verblassen. Allerdings ist im Hinblick auf spezifische prozessabhängige Aspekte die Bezeichnung als Arbeitsgedächtnis hier vorzuziehen. Da das Halten, Abrufen und auch die weitere Prozessierung für die zielführende Bearbeitung einer Aufgabe eine wesentliche Rolle spielt und somit einer mentalen Arbeitsleistung zugrundeliegt. Der Aspekt der eigentlichen Stimulusprozessierung wie z.B. dessen „mentale Rotation“ wird in den geläufigen Arbeitsgedächtnismodellen jedoch bislang weitgehend vernachlässigt (Repovs & Baddeley 2006). Als weithin akzeptiertes Arbeitsgedächtnismodell liegt das von Baddeley und Kollegen vor.

Grundsätzlich gilt, dass die Zuführung von kurzzeitig gehaltenen Informationen zum Langzeitgedächtnis möglich ist. Ebenso kann eine Integration von Langzeitwissen zur Erstellung eines semantischen Zusammenhanges der Information zu einer Unterstützung und effizienteren Speicherkapazität im Kurzzeitgedächtnis führen. Dies bedeutet konkret, dass sich z.B. zusammenhängende Sätze besser gemerkt werden können als unzusammenhängende Wortab-

folgen. Diese zwischen Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis bestehende Komponente bezeichnet Baddeley daher auch als episodischen Puffer. Es werden hier hauptsächlich Informationen aus dem episodischen Langzeitgedächtnis integriert.

Je nach Art des Eingangsmediums wird von einer Trennung des phonologischen vom visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis ausgegangen (Baddeley 2003a). Anhalt für diese Annahme ergab sich u.a. aus Studienergebnissen bei der die Performanz der Probanden bezüglich der Bearbeitung einer visuell-räumlichen Aufgabe durch das zusätzliche Ausführen einer weiteren visuell-räumlichen Aufgabe gemindert wurde - jedoch nicht durch die Durchführung einer zusätzlichen rein verbalen Aufgabe. Ebenso ergeben sich klinische Hinweise hierfür durch die Beobachtungen an hirngeschädigten Patienten, die z.B. nach einem Schlaganfall Ausfälle bezüglich des visuell-räumlichen Gedächtnisses haben, jedoch nicht das verbale Arbeitsgedächtnis betreffend (de Renzi & Nichelli 1975). Eine weitere Unterscheidung erfolgt bezüglich der visuell-räumlichen Komponente selbst. Wobei die visuelle Komponente als objektbezogen angesehen werden kann. Die räumliche Komponente fließt hingegen in motorische Abläufe ein (Salway & Logie 1995, Repovs & Baddeley 2006).

Die mentalen Abbildungen der dargebotenen Stimuli unterscheiden sich dementsprechend auch gemäß ihrer Eingangsmodalität. Baddeley nahm zunächst an, dass es sich bei seinem als „visuell-räumlichen Notizblock“ bezeichneten Speichermodul um einen passiven räumlichen Speicher handelt.

In Zusammenschau mit den Ergebnissen, die eine getrennte Verarbeitung der visuellen und räumlichen Komponente wahrscheinlich machen, entwickelte Logie die These, dass die räumliche Information durch einen aktiven Rehearsalprozess und die rein visuelle Information passiv gespeichert wird. Diese Komponenten werden auch als „inner scribe“ im Sinne des aktiven Prozesses und als „visual cache“ als passives Pendant bezeichnet.

Grundsätzlich gibt es zwei bedeutende Verarbeitungsnetzwerke für visuelle Information. Der ventrale Verarbeitungsweg ist Ausdruck der Verarbeitung perzeptiver Komponenten des Stimulus; also v.a. der Objekteigenschaften wie etwa Farbe, Größe oder Form. Ihm gegenüber steht der dorsale Verarbeitungsweg der durch die Prozessierung handlungsrelevanter Informationen; wie z.B. die Objektposition oder dessen Orientierung zum Ausdruck kommt (Goodale & Milner 1992, Milner & Goodale 2008). Der ventrale Pfad verläuft dabei vom primär visuellen Kortex (V1) über die assoziativen Sehrindenareale (V2 und V4) in den inferioren Temporallappen. Der dorsale Pfad hingegen führt ebenfalls vom primär visuellen Kortex über die assoziativen Sehrindenbereiche (V5) in den Parietallappen (Pinel 2001). Bei einer mentalen

Rotationsaufgabe fließen sowohl die visuelle als auch die räumliche Arbeitsgedächtniskomponente mit ein. Wobei zur Bearbeitung der Aufgabe insbesondere die räumliche Komponente eine wesentliche Rolle spielt. Da eine Differenzierung der Objektausrichtung und somit die Prozessierung einer handlungsrelevanten Information im Vordergrund steht, - neben natürlicherweise der passiven visuellen Speicherung des Objektes. Dem präfrontalen Kortex werden Exekutivfunktionen zugeschrieben. Diese spielen eine Rolle sowohl beim Halten und Bearbeiten der Information als auch bei der hierfür notwendigen Aufmerksamkeitssteuerung (Ventre-Dominey *et al.* 2005, Fuster 2000).

Bezüglich der Prozessierungskomponente einer mentalen Rotationsaufgabe kann insbesondere dann eine Aussage gemacht werden, wenn ein sequenzieller Versuchsaufbau vorliegt. Hierdurch kann eine Aussage über mentale Repräsentationsmechanismen gemacht werden, wenn der eigentliche visuelle Stimulus fehlt. Es konnte so die Annahme gestützt werden, dass die mentale Rotation in erster Linie ein räumlicher Verarbeitungsprozess ist. Hierbei soll insbesondere die Extraktion und Verarbeitung relevanter orientierungsabhängiger Information eine Rolle spielen (Liesefeld & Zimmer 2013). Orientierungsabhängige Information ändert sich, wie der Name schon sagt, im Zuge der Orientierung eines dargebotenen Stimulus. Beschreibbar durch oben-unten, rechts-links bzw. vor-hinter. Wohingegen orientierungsunabhängige Information auch mit einem Orientierungswechsel stabil bleibt. Der kurze Strich des Buchstaben F z.B. hat immer mittigen Kontakt mit dem langen Strich; im Sinne einer orientierungsunabhängigen Information. Allerdings ist nach einer 180° Drehung der kurze Strich links und nicht mehr rechts was die entscheidende Information darstellt (F vs. Ƀ). Dies impliziert, dass nicht etwa ein gesamtes Bild im Kopf gedreht wird, sondern vielmehr die Extraktion der entscheidenden räumlichen Information an erster Stelle steht. Also explizite orientierungsabhängige Information rotiert bzw. prozessiert wird (Liesefeld 2012). Dies ist v.a. dann der Fall, wenn die Rotationsaufgabe bei erhöhter Winkeldisparität an Komplexität gewinnt. Falls sich die Stimuli nicht in orientierungsabhängiger Information unterscheiden, kann der Vergleich auch ohne mentale Rotation ausgeführt werden, da diese dann nicht notwendig ist. Dies spiegelt sich auch in den kurzen Antwortzeiten und deren Unabhängigkeit von der Winkeldisparität wieder (Takano 1989).

Der Versuchsaufbau in vorliegender Studie ist nicht im Hinblick auf die Untersuchung der Arbeitsgedächtnisfunktionen selbst ausgerichtet worden. Allerdings ist die mentale Rotation als eine Aufgabe anzusehen, die als wesentlichen Teilaspekt eine Arbeitsgedächtniskomponente beinhaltet.

2.1.1.4 Geschlechtseffekte der Mentalen Rotation

Bei der Bearbeitung räumlicher Aufgaben sind Geschlechtsunterschiede bekannt. Bereits im frühkindlichen Alter konnten diese festgestellt werden. So fanden Quinn und Liben 2008 heraus, dass Jungen im Alter von drei Monaten den Unterschied zwischen Bild und Spiegelbild deutlich besser wahrnehmen als Mädchen im gleichen Alter (Quinn & Liben 2008). Auch ein während des Erwachsenenalters weiterbestehender Geschlechtseffekt, die Performanz der mentalen Rotation betreffend, konnte beobachtet werden. Dieser war über alle betrachteten Altersklassen (20 bis 70 jährige Probanden) hinweg vorhanden. Zwar nahm die Performanz mit dem Alter insgesamt, sowie auch der Geschlechtseffekt selbst ab, jedoch waren die männlichen Probanden stets besser als die weiblichen (Jansen & Heil 2010). Für die Modulierbarkeit dieser Effekte spricht eine Studie die den Geschlechtseffekt im Kindesalter durch geeignete Trainingseinheiten deutlich reduzieren konnte. Diese Interventionen beinhalteten Aufgaben die die Repräsentation und Transformation visuell-räumlicher Information fördern (Tzuriel & Egozi 2010). Als ursächlich für diese Performanzunterschiede werden auch verschiedene Verarbeitungsstrategien angesehen. Bei weiblichen Probanden wird von einem analytischen Prozess berichtet, bei männlichen hingegen von einem holistischen. Dies bedeutet, männliche Probanden tendieren dazu, den Stimulus als Ganzes zu rotieren. Frauen drehen das Objekt stückweise, also jedes gedachte Teil eines Stimulus einzeln. Dies wird u.a. als Erklärung dafür herangezogen, dass die Rotationszeit bei Frauen mit zunehmender Stimuluskomplexität der Polygone zunimmt, bei Männer hingegen nicht (Heil & Jansen-Osmann 2008).

Grundsätzlich gibt es Erklärungsmodelle die die beobachtete unterschiedliche Performanz zwischen den Geschlechtern auch als Ausdruck eines soziokulturellen und psychologischen Effektes ansehen und immanente divergierende Fähigkeiten diesbezüglich hinterfragen. Dies bedeutet konkret, dass u.a. der Einfluss der Selbsteinschätzung durch z.B. bestehende Vorurteile hierbei mit einzubeziehen ist. Allerdings gibt es auch hier in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse. Es konnte gezeigt werden, dass Selbstvertrauen die Performanz signifikant beeinflusst und nach Ausschaltung dieser als möglichen Konfundierungsfaktor kein Geschlechtsunterschied mehr nachzuweisen ist (Estes & Felker 2012). Allerdings schien die Beeinflussung der Probanden mit stereotypen Sichtweisen bezüglich ihrer Fähigkeiten keinen signifikanten Einfluss zu haben. Somit ist ein Absinken der Leistung bei Mädchen die hiermit konfrontiert werden nicht zwingend zu beobachten (Dunst *et al.* 2013)

Eine Studie die sich vorwiegend mit den Geschlechtsunterschieden funktioneller MRT - Daten während der mentalen Rotation beschäftigt konnte hierbei keine signifikanten Unterschiede feststellen. Wobei eine bessere Performanz mit der stärkeren Aktivierung des IPS beidseits einherging (Semrud-Clikeman *et al.* 2012). In einer weiteren Studie konnten ebenfalls keine signifikanten funktionellen Unterschiede in der Hirnaktivierung zwischen Mann und Frau während der mentalen Rotation festgestellt werden, jedoch die Performanz betreffend, wobei die männlichen Probanden besser abschnitten (Halari *et al.* 2006). Gegenteilige Ergebnisse wurden erhoben, nachdem der Performanzunterschied zwischen den Geschlechtern als Konfundierungsfaktor ausgeschaltet wurde. Die Reaktionszeit und die Fehlerrate betreffend, ergaben sich also keine signifikanten Unterschiede, allerdings bezüglich der neuronalen Aktivierungen. Dies stützt die Theorie, dass unterschiedliche Strategien zum Tragen kommen, die sich in verschiedenen Prozessaktivierungen widerspiegeln, wobei jede für sich genommen als effizient betrachtet werden kann (Jordan *et al.* 2002).

2.1.2 Verarbeitung numerischer Information

2.1.2.1 Modell der numerischen Verarbeitung - das Triple - Code Modell

Die Verarbeitung von Zahlen kann basierend auf dem Triple-Code Modell von S. Dehaene in unterschiedliche Entitäten unterteilt werden.

Hierdurch wird deutlich, dass der Umgang mit Zahlen durch das komplexe Zusammenspiel kognitiver Grundmodalitäten zustandekommt. Wobei festgestellt wurde, dass eine grundlegende Kompetenz vieler Lebewesen die Semantik betreffend, bezogen auf das nicht-symbolische Größenverständnis, existiert; diese wird auch als ancient approximate number-system (ANS) bezeichnet (Piazza *et al.* 2013).

Bereits Kinder im Alter von wenigen Monaten sind in der Lage die Anzahl der Elemente einer Menge mit der einer anderen in Relation zu setzen und somit deren Kardinalität einzuordnen. Ebenso ist die Fähigkeit für rudimentäre arithmetische Prozesse bereits vorhanden (Starkey & Cooper 1980).

Interessante Aspekte ergeben sich auch aus Studien, die sich mit dem Zahlenverständnis indigener Völker beschäftigen (Dehaene *et al.* 2008). Zahlensysteme, inbegriffen deren symbolischer Zeichen sind hier häufig nur in einfacher Form vorhanden, da die kulturelle Transmission teilweise ausblieb, und die uns geläufigen Zahlensysteme keine Anwendung finden. Hierdurch können mathematische Feinheiten nur partiell adäquat sprachlich oder schriftlich ausgedrückt werden. Dennoch besteht ein davon unabhängiges numerisches Größenverständnis und die Fähigkeit, arithmetische Prozesse durchzuführen. Allerdings scheint die Präzision, mit der auch höhere mathematische Leistungen durchgeführt werden können, mit den Abbildungsmöglichkeiten durch das verwendete Zahlensystem zu steigen.

Der Zugang zu Bildung kann allerdings auch die Exaktheit der basalen Zahlenverarbeitung steigern. Somit besteht eine gegenseitige Beeinflussung zwischen symbolischer und nicht-symbolischer Zahlenverarbeitung (Piazza *et al.* 2013).

Da die Einführung von Zahlensymbolen erst einige tausend Jahre zurückliegt, die evolutionär bedingte rudimentäre Verarbeitung von Objektanzahlen jedoch schon viel länger besteht, kann davon ausgegangen werden, dass eine Umfunktionierung oder vielmehr Erweiterung der Funktion einer vorbestehenden neuronalen cerebralen Einheit u.a. durch die Neuverknüpfung mit anderen Einheiten zur heutigen Verarbeitung von Zahlensymbolen genutzt wird. Da eine

evolutionär bedingte Neuentstehung von Hirnarealen, die exklusiv für die Verarbeitung von kulturell bedingten Zahlensymbolen verantwortlich sind sehr unwahrscheinlich ist.

Diese Theorie der „Weiterverwendung“ ist auch als „neuronale Recycling Hypothese“ bekannt. Da dieser „Weiterverwendung“ im Bereich des Erlernens kultureller Errungenschaften bzw. deren Entwicklung allerdings keine genetische Modifikation zugrundeliegt, sondern vielmehr ein Ausdruck der Plastizität des menschlichen Gehirnes ist, ist der Begriff der „Exaptation“, der in der Evolutionsbiologie beheimatet ist, hier nicht direkt zu übernehmen.

Exaptation meint, im Gegensatz zu Adaptation, das Vorhandensein von Eigenschaften, die heute einen Vorteil bieten initial aber nicht für diesen Zweck über natürliche Selektion ausgebildet wurden, in früherer Zeit jedoch auch schon eine Funktion besaßen und nun quasi zweckentfremdet eine Verwendung finden. Im Gegensatz dazu ist unter Adaptation die selektive Ausbildung von Eigenschaften gemeint, die nur zur Generierung eines heutigen Vorteils stattfand. Zwar unterscheiden sich diese Begrifflichkeiten zunächst nur geringfügig, dennoch sind sie inhaltlich nicht gleichzusetzen.

Es wird deutlich, dass Exaptation die Verwendung von Funktionen meint, denen ursprünglich eine andere Bedeutung zukam. Ebenso kann man die Verwendung von Hirnarealen, die initial für die Einordnung von Größen im Allgemeinen gebraucht wurden und heute für die Verarbeitung von Zahlen genutzt werden als Ausdruck solch eines „Recyclingprozesses“ ansehen. Was somit die Basis der Verquickung von räumlichem Vorstellungsvermögen und der Durchführung arithmetischer Aufgaben darstellen würde. Es handelt es sich also bei der Begrifflichkeit der Exaptation und der „neuronalen Recycling-Hypothese“ um Modelle, denen ein verwandtes Konzept, die Verwendung und Weiterentwicklung menschlicher Eigenschaften betreffend, zugrundeliegt.

Dem Modell der „neuronalen Recycling-Hypothese“ liegen im Wesentlichen 3 Grundpostulate zugrunde, die interessant für das Verständnis der Spezialisierung des menschlichen Gehirns sind (Dehaene & Cohen 2007):

1. Die Organisation des menschlichen Gehirns ist stark geprägt von evolutionär bedingten anatomischen und funktionellen Gegebenheiten. Diese neuronalen Strukturen sind ab der Geburt vorhanden und beeinflussen das Erlernen aller folgenden neuen Fähigkeiten.
2. Kulturelle Errungenschaften müssen so ihre „Nische“ in den gegebenen neuronalen Kreisläufen finden, die dann eine Einheit bilden und nah genug an der erforderlichen

Funktion für die Durchführung einer Tätigkeit (z.B. Rechnen) sind. Ebenfalls sollten diese durch ihre Plastizität in der Lage sein, sich den immer neuen Anforderungen anzupassen.

3. Kortikale Areale die evolutionär gesehen älteren Funktionen zuzuordnen sind, werden von neuen kulturellen Aspekten infiltriert und modifiziert. Ihre Grundstruktur geht hierbei jedoch nie völlig verloren und hat deshalb einen gewichtigen Anteil an der Organisation aller kulturellen Leistungen.

Ein Modell, welches die multimodale Verarbeitung von Zahlen beschreibt und hierdurch wiederum die Anpassungsfähigkeit basaler Mechanismen und deren Ausbau bezüglich einer Funktion, die im Zuge der kulturellen Weiterentwicklung gefordert wird, stützt, ist das Triple-Code-Modell von Stanislas Dehaene (Dehaene 1992). Es handelt sich hierbei um drei wesentliche Grundaspekte der Zahlenverarbeitung, die im Folgenden jeweils kurz näher beschrieben werden.

Zunächst einmal gibt es die präverbale Repräsentation von Größen, die als dem Zahlenverständnis zugrundeliegend angesehen werden kann. Diese ist bereits wie der Name schon impliziert, bei Kindern bevor sie linguistische Fähigkeiten erwerben und sogar bei Tieren vorhanden. Die non-verbale Art der Größenverarbeitung bezieht sich hierbei im Speziellen auf das Abschätzen von Mengenmächtigkeiten sowie die simultane Erfassung von Objekten einer Menge. Diese Mechanismen werden im Weiteren dann für Vorgänge wie den Vergleich von Größen und Schätzaufgaben verwendet. Die Vorstellung, die diesem Aspekt der Zahlenverarbeitung zugrundeliegt, ist das Vorhandensein eines „analogen Größen-Codes“. Bei dem Größen - im Sinne von Anzahlen - entlang eines internen räumlich orientierten Zahlenstrahls bzw. Größenstrahls - vor Erwerb der Zahlensymbolik – repräsentiert sind. Es wird angenommen, dass diese analoge Repräsentation wiederum dem Weber-Fechner-Gesetz für subjektive Sineindrücke unterliegt, und somit nur Größenunterschiede diskriminiert oder wahrgenommen werden können, die mind. 2% der objektiven Ursprungsgröße ausmachen. Konkret bedeutet das, dass ein Set von Items mit 500 Objekten erst von einem anderen unterschieden werden kann, wenn die Differenz mind. 10 beträgt. Es spiegelt sich hiermit also direkt die Unschärfe der subjektiven Mengenverarbeitung wieder. Insgesamt kann man diesen basalen Mechanismus jedoch dem semantischen Aspekt der Zahlenverarbeitung zuordnen, da er abgekoppelt vom Einsatz symbolischer Zeichen und deren lexikaler und syntaktischer Verarbeitung bereits vorhanden ist.

Ein weiterer Repräsentationsweg kommt durch die linguistische Verarbeitung von Zahlen zustande. Unter ihm wird sowohl der verbale als auch der schriftbezogene Weg subsummiert. Er beinhaltet den Umgang mit Grundbausteinen der Sprache und in diesem Zusammenhang hauptsächlich die mentale Manipulation von Wortabfolgen (z.B. sechs-hundert).

Eine dritte Manipulationsmöglichkeit von Zahlen kommt durch die Verwendung von arabischen Ziffern zustande. Also im Sinne einer exklusiven Schriftsprache für die Abbildung numerischer Größen, bei der jeder Quantität ein eigenes Symbol zu Teil wird. Bei deren Repräsentation wird ähnlich der prälinguistischen Verarbeitung die mentale Abbildung auf eine Art räumliches Medium angenommen (Dehaene 1992, Hayes 1973). Ein entscheidender Vorteil ist jedoch die Objektivierung von Quantitäten und deren präzise Darstellungsmöglichkeit.

Insgesamt hängt jede Art der Zahlenverarbeitung mit einer bestimmten Eingangs - und Ausgangsmodalität zusammen. Wobei jedes Medium der Zahlenverarbeitung über komplexe subsequenzierte Zwischenschritte miteinander in Verbindung steht und diese sich teilweise gegenseitig bedingen oder ergänzen. Ebenso kann hierdurch jede numerische Aufgabe in eine Sequenz mehrerer Komponenten unterteilt werden, die immer in Zusammenhang mit dem jeweiligen Eingangsmedium stehen. Gleichzeitig differieren die Subkomponenten hierbei jeweils im Format ihrer Verarbeitung.

Wobei der primitivsten und damit grundlegendsten Art der Verarbeitung im Sinne der prälinguistischen, eine besondere Bedeutung als semantische Grundlage zukommt. Diese ist wie schon erwähnt auch in nicht menschlichen Lebewesen als entscheidende Fähigkeit, die mitunter das Überleben eines Individuums mitbestimmen kann, vorhanden. Schrift und Sprache als eine dem Menschen vorbehaltene Kulturleistung erlauben es, diese semantischen Grundlagen zu verfeinern. Im Zuge dessen wurde eine eigens diesem Zweck vorbehaltene Zahlensymbolik entwickelt. Dabei kann angenommen werden, dass sich die heutige Verarbeitung von Zahlen auf alle genannten drei Grundmodalitäten stützt und je nach Art der Konfrontation zu verschiedenen miteinander interagierenden komplexen cerebralen Abläufen führt.

2.1.2.2 Effekte der Größenrepräsentation

Effekte, die die Größenrepräsentation in der Zahlenverarbeitung widerspiegeln sind der Distanzeffekt, der Problemgrößeneffekt und der SNARC - Effekt (Nuerk *et al.* 2001). Wobei insbesondere der SNARC - Effekt zum Aufbau des Paradigmas in vorliegender Studie beigetragen hat. Spezielle Aspekte die sich nur auf diese Effekte beziehen waren nicht Gegenstand vorliegender Arbeit.

SNARC-Effekt

Der SNARC - Effekt (spatial numerical association of response codes) wurde erstmals von Dehaene, Bossini und Giraux 1993 (Dehaene *et al.* 1993) beschrieben. Es wurde beobachtet, dass eine linksseitige Antwortgabe schneller und akkurater für kleine Zahlen und eine rechtsseitige - für große Zahlen erfolgt. Die Hände waren während der Aufgabe auch überkreuzt. Somit war der SNARC - Effekt als unabhängig von Assoziationen zur rechten oder linken Hand anzusehen und vielmehr Ausdruck von Repräsentationsmechanismen der Zahlenabfolge. Diese Repräsentationen basieren somit auf einem auf die Umwelt bezogenen Referenzrahmen. Bei blinden Individuen konnte hier ein umgekehrter SNARC-Effekt für den Fall der überkreuzten Hände gezeigt werden (Crollen *et al.* 2013). Dies ist am ehesten Ausdruck einer internen auf körperbezogene Repräsentationen beruhenden Größenvorstellung. Allerdings konnte eine Studie die den Effekt mit überkreuzten Händen bei sehenden Individuen verifizieren wollte den SNARC-Effekt nicht replizieren (Wood *et al.* 2006a). Interessant ist jedoch, dass hier vier verschiedene Darstellungsarten von numerischen Größen verwendet wurden, arabische Ziffern, Zahlwörter, auditiv dargebotene Zahlwörter und Würfelmuster. Bei allen diesen Darstellungen konnte der SNARC-Effekt für die Kondition mit nicht gekreuzten Händen nachgewiesen werden. Somit kann der SNARC Effekt durchaus als Ausdruck einer von links nach rechts orientierten mentalen Abbildung des Zahlenstrahls angesehen werden, der modalitätenübergreifend ist. Dieser Effekt ist somit also als Ausdruck einer semantischen amodalen Zahlengrößenrepräsentation zu verstehen (Nuerk *et al.* 2005b). Bei dem allerdings nicht nur reine Repräsentationsmechanismen, sondern wohl auch handassoziierte Einflüsse eine Rolle spielen (Wood *et al.* 2006a).

Distanzeffekt

Der Distanzeffekt besagt, dass die numerische Distanz zwischen zwei zu vergleichenden Zahlen die Reaktionszeit und die Fehlerrate der Antwortgabe beeinflusst (Moyer & Landauer, 1967). Wenn die Distanz der Zahlen zueinander relativ groß ist, kann schneller und korrekter geantwortet werden (vgl.: 1 vs. 2 und 1 vs. 8). Dies bedeutet, dass die Diskriminierung der Zahlenlängengrößen zueinander dann einfacher ist. Dieser Effekt ist ebenfalls durch eine analoge Größenrepräsentation entlang des Zahlenstrahles zu interpretieren (Meert *et al.* 2012). Die Reaktionszeit nimmt umgekehrt proportional zur logarithmischen Distanz ab, passend zur logarithmischen Stauchung des Zahlenstrahles. Durch die notationsunabhängige Darbietung dieses Effektes kann er ebenfalls als Ausdruck einer amodalen semantischen Größenrepräsentation angesehen werden (Buckley & Gillman 1974). Der Distanzeffekt korreliert auch negativ mit der Aktivierung im präfrontalen und präzentralen Arealen (Ansari 2008).

Problemgrößeneffekt

Der Größeneffekt wiederum spiegelt eine Verschlechterung in der Performanz wider, wenn die Distanz der zu vergleichenden Zahlen gleich bleibt, deren absolute Größe aber zunimmt (vgl.: 1 vs. 3 und 7 vs. 9).

Nach Dehaene kann dieser Effekt durch die analoge Größenrepräsentation der Zahlen entlang des Zahlenstrahls interpretiert werden (Dehaene 1992). Durch die angenommene logarithmische Stauchung dieser Größenrepräsentation können größere Zahlen schlechter voneinander diskriminiert werden als kleine, da sie relativ gesehen näher aneinander liegen als die kleinen Zahlen. So kann es zu sich überlappenden Repräsentationen im höheren Zahlenbereich kommen.

Der Problemgrößeneffekt kann bei einfachen arithmetischen Aufgaben z.B. Additions- und Multiplikationsaufgaben beobachtet werden. So steigt auch hier die Fehlerrate und die Reaktionszeit bis zur Antwortgabe mit zunehmender Größe der verwendeten Operanden. Dabei ist der Anstieg der Reaktionszeit nicht linear sondern korreliert mit der Quadratsumme der Operanden (Miller *et al.* 1984).

Eine Erklärung für diesen Performanzabfall kann in dem erschwerten Abruf von Gedächtnisinhalten gefunden werden. Da mit kleinen Zahlen häufiger umgegangen wird, ist von einer einfacheren und effektiveren Lösung arithmetischer Aufgaben auszugehen. Ebenso kann ein entwicklungsbedingter Strategiewechsel angenommen werden. Bei Kindern im Grundschulal-

ter kann eine Problemlösung basierend auf Zählverfahren beobachtet werden. Erst mit zunehmendem Alter kommt es zu einem vermehrt abstrakten Abruf von Gedächtnisinhalten, wobei Zählverfahren weiterhin eine Rolle spielen (Ashcraft 1992).

2.1.2.3 Pathophysiologische Zusammenhänge dissoziierte Systeme der Zahlenverarbeitung stützend

Eine dem multimodalen Verarbeitungskonzept entsprechende funktionelle Differenzierung konnte ebenfalls anhand neurophysiologischer Studien gezeigt werden.

So konnte z.B. anhand von Patienten, bei denen eine reine Alexie vorlag und gleichzeitig die Fähigkeit zum Lesen arabischer Zahlensymbole und deren Größenvergleich erhalten war gezeigt werden, dass es sich hierbei um isolierte Vorgänge handelt. Allerdings waren linguistisch determinierte Fähigkeiten eingeschränkt, wie etwa das laute Vorlesen von Zahlen, das Verständnis für mehrstellige Ziffern aber auch das Kopfrechnen. Diese Beobachtung stützt wiederum die These, der multimodalen Verarbeitung von Zahlen, des Triple-Code Modelles (Cohen & Dehaene 1995, Cantlon et al. 2009).

Dies zeigt auch, dass die Durchführung arithmetischer Aufgaben je komplexer sie werden und weniger einfach vorstellbar sind, zunehmend mit Hilfe verbaler Grundstrukturen durchgeführt werden. Multiplikationsaufgaben sind auch als Fähigkeiten, die u.a. auf verbal erlernten Strukturen basieren anzusehen.

Eine Dissoziation zwischen exakten Rechenprozeduren und Schätzaufgaben bzw. Aufgaben, bei denen kein Abruf von Faktenwissen im Vordergrund steht, konnte bereits an mehreren Fallbeispielen belegt werden (Cohen & Dehaene 2000, Pesenti *et al.* 1994, van Harskamp & Cipolotti 2001, Dagenbach & McCloskey 1992).

Eine Studie, die zwei Patienten mit unterschiedlichen Grunderkrankungen vergleicht, zeigt wie sich die Einschränkung hinsichtlich der Funktion bestimmter Hirnareale auf den Umgang mit Zahlen auswirkt. Es wurde ein Patient mit einer Art der frontotemporalen Demenz - genauer semantischen Demenz - und ein Patient, der klinische Symptome des Gerstmann-Syndroms zeigte und eine Schädigung des linken Intraparietalsulcus vorwies, untersucht. Die semantische Demenz hat Einbußen des verbalen und nicht-verbalen semantischen Gedächtnisses zur Folge, wobei insgesamt das Defizit die verbale Domäne betreffend überwiegt und mit einer Störung des linken Temporallappens assoziiert ist. Die Läsion des linken Parietallappens hatte im Wesentlichen Einbußen bei der Verarbeitung von numerischen Größen zur

Folge. Es konnte gezeigt werden, dass der aphasische Patient mit der semantischen Demenz eher ein Problem bei der Durchführung von Multiplikationsaufgaben und exakten Rechenprozeduren hatte. Die Fähigkeit zur Subtraktion hingegen war weniger beeinträchtigt. Ebenso hatte er nahezu erhaltene Fähigkeiten bei Schätzaufgaben und bei der Verarbeitung nicht-symbolischer Größen (Punktmengen).

Der am Gerstmann-Syndrom leidende Patient zeigte das umgekehrte funktionelle Schädigungsmuster. Es traten vorwiegend Probleme bei Subtraktionen und weniger bei Multiplikationsaufgaben auf. Ebenso war die Fähigkeit zu Schätzaufgaben und Punktmengenerfassungen beeinträchtigt (Lemer *et al.* 2003).

2.1.2.4 Spezielle Aspekte der Zahlenrepräsentation im Kindesalter

Die Zahlenverarbeitung im Kindesalter kann nicht direkt von der im Erwachsenenalter übernommen werden, da von einigen Besonderheiten auszugehen ist. Diese sind auf entwicklungsbedingte Veränderungen der Repräsentation und Verarbeitung numerischer Information zurückzuführen. Die Verknüpfung zwischen den drei grundlegenden Darstellungsarten numerischer Größen erfolgt erst im Laufe der Entwicklung. Aus der Studie von Benoit *et al.* geht hervor, dass die Zuordnung eines Zahlwortes zu der arabischen Ziffer am spätesten in der Entwicklung erfolgt (im Alter von 5 Jahren bereits durchführbar) (Benoit *et al.* 2013). Nachdem die Zahlwörter einer Menge und danach die arabischen Ziffern zu einer Menge zugeordnet werden können. Bislang sind die Arbeiten zur Untersuchung der Zahlenverarbeitung bei Kindern allerdings insgesamt eher unterrepräsentiert (Kaufmann *et al.* 2011). Diese zeichnen sich zudem durch unterschiedliche Paradigmen aus. Dies führt zu vielschichtigen und uneinheitlichen Ergebnissen. Es liegen Studien vor, in denen v.a. die Verbindung zwischen symbolischer und nicht-symbolischer numerischer Verarbeitung genauer betrachtet wird. Es wird hier u.a. eine räumliche Kontrollaufgabe für die nicht-symbolische Verarbeitung verwendet (Holloway & Ansari 2010). Ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit ist jedoch die semantische Komponente der numerischen Verarbeitung unabhängig ihrer Präsentationsart genauer zu betrachten, wobei der Zusammenhang zur räumlichen Verarbeitung weitgehend außer Acht blieb. Nach Subtraktion der Kontrollbedingungen hat die Conjunction-Analyse zu einer Aktivierung insbesondere des rechten IPL geführt. Dieser war hierbei im Erwachsenenalter stärker aktiviert als im Kindesalter. Die Studie von Kaufmann *et al.* hat den Zusammenhang zwischen nicht-symbolischer numerischer und räumlicher Verarbeitung genauer beleuchtet (Kaufmann *et al.* 2008). Die numerische Versuchsbedingung sowie die Kontrollbedingung

wurden jeweils mit Handstimuli durchgeführt. Hierbei kann eine Induktion stimuluspezifischer Verarbeitungen nicht ausgeschlossen werden. Dennoch wurde durch den Kontrast „Zahl>Raum“ ein frontoparietales Netzwerk (IPS und Gyrus supramarginalis beidseits; angrenzend an GA, linker Gyrus postzentralis, Lobus paracentralis; rechter superiorer Frontalgyrus) aktiviert sowie occipitale Areale, die im Wesentlichen die visuelle Verarbeitung der Stimuli widerspiegeln. Im Vergleich zur Gruppe der Erwachsenen war hier v.a. der inferiore Parietallappen beidseits sowie der rechte Post - und Präzentralgyrus verstärkt aktiviert. Weiterhin wurden Gruppenunterschiede zwischen Kindern mit und ohne Dyskalkulie für die Verarbeitung nicht-symbolischer Größen erhoben (Kaufmann *et al.* 2009). Es konnte eine verstärkte aufgabenspezifische Aktivierung der Kinder *mit* Dyskalkulie gegenüber denen ohne Dyskalkulie im inferioren Parietalkortex beidseits mit einer Linkslateralisierung (IPS, Gyrus supramarginalis, mit Ausweitung in den linken Gyrus angularis) beobachtet werden. In der Meta-Analyse von Kaufmann *et al.* konnte eine verstärkte Aktivierung der Kinder ohne Dyskalkulie für die Verarbeitung symbolischer und nicht-symbolischer Aufgabentypen im linken posterioren IPS (Präcuneus), rechten inferioren Parietallappen (nahe des posterioren IPS) sowie im linken frontalen präzentralen Kortex (Brodmannareal 6) sowie im rechten dorsolateralen Präfrontalkortex nachgewiesen werden (Kaufmann *et al.* 2011). Kinder mit Dyskalkulie zeigten eine verstärkte Aktivierung im inferioren Parietallappen beidseits (rechts nahe des Gyrus supramarginalis, links nahe des lateralen IPS) und im präzentralen Frontalkortex rechts (Brodmannareal 6).

Ein anschauliches Übersichtsmodell die Entwicklung der Zahlenverarbeitung betreffend, ist in folgendem Diagramm dargestellt (Abb. 3). Aus diesem geht hervor, dass mit zunehmendem Alter von einer verstärkten Überlappung der unterschiedlichen Repräsentationswege auszugehen ist. Dies führt dann zu einem effizienteren Umgang mit numerischer Information, sei sie symbolisch oder nicht-symbolisch. Dieser Expertisengewinn ist auch als Grundlage für höhere Leistungen arithmetische Aufgaben betreffend anzusehen. Grundsätzlich besteht aber eine gegenseitige Beeinflussung aller dargestellten Teilkomponenten. Deshalb wird vorliegende Studie im Kindesalter durchgeführt. Gerade in diesem Probandenkollektiv kann eine im Vergleich zum Erwachsenenalter erschwerte Informationsextraktion der Zahlensymbole angenommen werden. Hier ist deshalb auch von einem besseren Kontrast der Zahlenverarbeitung gegenüber der mentalen Rotation auszugehen.

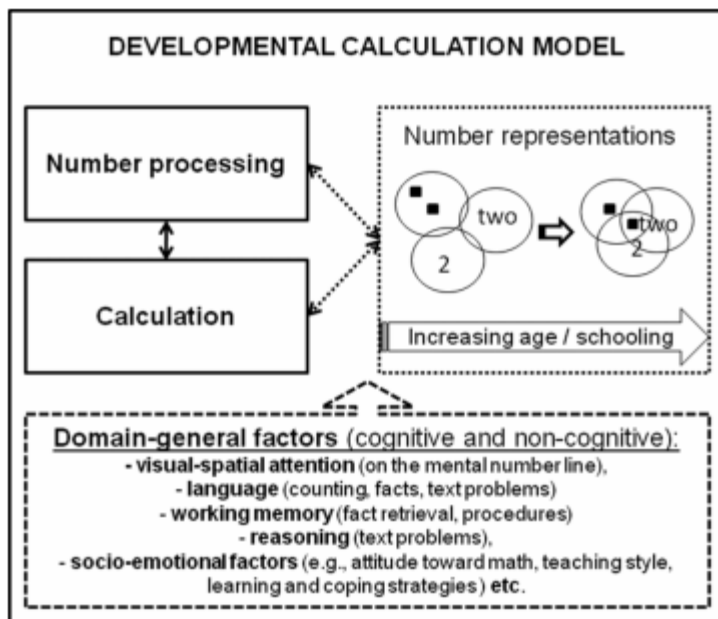


Abb. 3 : Übersichtsmodell der Entwicklung arithmetischer Fertigkeiten, aus Liane Kaufmann et al. 2011; Meta-Analyses of Developmental fMRI-Studies Investigating Typical and Atypical Trajectories of Number Processing and Calculation (Kaufmann *et al.* 2011)

2.1.2.5 Verarbeitung mehrstelliger Zahlen

Eine besondere Rolle kommt der Repräsentation von mehrstelligen Zahlen zu. Wenn von einer Größenrepräsentation entlang eines mentalen Zahlenstrahles ausgegangen wird, so muss dieser auch entsprechend der Zahlengröße Besonderheiten aufweisen, da sich diese auf behavioraler Ebene gezeigt haben. In diesem Zusammenhang sollte die Mental-number-line Compression erwähnt werden (Viariouge *et al.* 2010). Sie ist die Vorstellung über eine logarithmische Repräsentation der Distanz zwischen zwei Zahlen auf dem Zahlenstrahl. So wäre die Distanz zwischen 10 und 20 (10 und 2×10) logarithmisch betrachtet die gleiche wie zwischen 100 und 200 (10^2 und 2×10^2) (Nuerk *et al.* 2005a). Sie drückt aus, dass Zahlen im mehrstelligen Bereich zunächst weniger gut voneinander diskriminiert werden können als einstellige. Dies findet dann in Form einer logarithmischen Stauchung des Zahlenstrahles Ausdruck. Erst mit zunehmender Expertise im Umgang mit Zahlen erfolgt eine zunehmend lineare Repräsentation der Größen. Wobei alle unabhängig ihrer Stellenanzahl gleich gut zugeordnet werden sollten. Die logarithmische Repräsentation ergibt sich auch dann, wenn nicht-symbolische Numerositäten dargeboten werden und diese nicht mehr zählbar sind. Ebenso scheint diese Art der Repräsentation intuitiv als erste vorzuliegen. Da sie auch bei kleinen Zahlen, wenn mangelnde schulische Bildung vorliegt, im Vordergrund steht. Die line-

are Repräsentation ist demnach Ausdruck einer kulturellen Entwicklung (Dehaene *et al.* 2008).

Die Studien, die die Verarbeitung mehrstelliger arabischer Ziffern untersuchen, fokussieren sich meist auf zweistellige Zahlen (Göbel *et al.* 2004, Ratinckx *et al.* 2006, Chan *et al.* 2011, Wood *et al.* 2006b, Moeller *et al.* 2011). Bei mehrstelligen arabischen Ziffern muss von einer besonderen Art der Repräsentation jeweils für die Zehnerstelle bzw. die Einerstelle ausgegangen werden. Ob der mentale Zahlenstrahl entsprechend der Zehnerstelle bzw. der Einerstelle der arabischen Ziffern in unterschiedliche Repräsentationen eingeteilt werden kann, ist allerdings weiterhin nicht eindeutig geklärt (Nuerk *et al.* 2001).

Insbesondere zweistellige Zahlen betreffend gibt es unterschiedliche Modelle für die Verarbeitung. Grundsätzlich kann hier zwischen dem streng getrennten, holistischen und hybriden Verarbeitungsweg unterschieden werden (Moeller *et al.* 2011, Dehaene *et al.* 1990, Verguts & de Moor 2005). Diese Modelle beziehen sich allerdings v.a. auf die Repräsentationen entlang des mentalen Zahlenstrahles. Im getrennten Modell wird eine zerstückelte Verarbeitung der Information angenommen. Dass also die Zehnerstelle und die Einerstelle getrennt voneinander entlang zweier unterschiedlicher Zahlenstrahle kodiert werden. Allerdings kann hier weiterhin unterschieden werden, ob die Verarbeitung sequentiell also nacheinander (zuerst die 3 dann die 10, in der 13) oder parallel stattfindet, die Zahl also im Ganzen wahrgenommen und verarbeitet werden kann. Der parallele Verarbeitungsweg wird mit zunehmendem Alter postuliert (Chan *et al.* 2011). Dennoch ist Grundlage dieses Modelles eine getrennte Repräsentation der Ziffern einer mehrstelligen Zahl. Das holistische Modell geht dahingegen davon aus, dass die Zahl von vornherein im Ganzen erfasst wird und ebenfalls entlang und in diesem Fall nur eines Zahlenstrahles repräsentiert wird. Das hybride Modell postuliert, dass beide Repräsentationsarten je nach Aufgabenanforderung herangezogen werden können. So könnte z.B. bei Schätzaufgaben der holistische Weg eine größere Rolle spielen. In einer Studie, die den wahrscheinlichsten Repräsentationsweg für zweistellige Zahlen herausstellen wollte, war eindeutig der streng getrennte Weg am zutreffendsten (Moeller *et al.* 2011).

Dies geht auch mit dem Kompatibilitätseffekt für zweistellige Zahlen konform, der eine holistische Repräsentation eher unwahrscheinlich macht. Dieser drückt aus, dass es zu einer besseren Performanz bei Zahlenvergleichsaufgaben kommt, wenn sich beide Ziffern einer Zahl gleich in Relation zur Größe der anderen Zahl verhalten. (bessere Performanz bei: 23 vs. 56; $2 < 5$ und $3 < 6$ als 27 vs. 43; $2 < 4$ aber $7 > 3$) (Nuerk *et al.* 2001). Diese Studie wurde jedoch an einem deutschsprachigen Probandenkollektiv durchgeführt.

Insgesamt ist von sprachbedingten Besonderheiten der Verarbeitung zweistelliger Zahlen auszugehen. Da die Umkehr der Ziffernabfolge im deutschsprachigen Raum stattfindet; anders als z.B. im Englischen oder Französischen. Auch ab der zweiten Dekade kommt es im deutschen Sprachgebrauch zu einer Ziffernumkehr: vgl. 13, drei-zehn, 23, drei-und-zwanzig. Dies ist z.B. im Englischen und Französischen nicht der Fall vgl. 23, twenty-three, vingt-trois. Die Zahlen von 10 bis 20 verhalten sich recht inhomogen, betrachtet man die landestypischen Unterschiede. Ab der Zwölf gibt es im Deutschen eine Umkehr, die bis zur 100 erhalten bleibt. Dafür ergeben sich z.B. im Französischen zusätzliche verbale Hürden durch die Komposition der Zahlwörter, z.B.: 99; quatre-vingt-dix neuf. Somit muss von sprachbedingten Verarbeitungskomponenten ausgegangen werden. Das mentale Vorsagen der Zahl kann hier eine strategische Ursache sein.

Allerdings hat die gesonderte Betrachtung eines englischsprachigen Probandenkollektivs bei Durchführung einer Zahlenvergleichsaufgabe mit zweistelligen Zahlen ebenfalls zu dem oben genannten Kompatibilitätseffekt geführt (Nuerk *et al.* 2005a). Somit ist dieser nicht als Nebeneffekt der deutschsprachigen Ziffernumkehr im zweistelligen Bereich anzusehen. Allerdings konnten dennoch sprachspezifische Verarbeitungen beobachtet werden.

Der Vergleich von Zahlwörtern hat bei deutschsprachigen Probanden zu einem Kompatibilitätseffekt geführt, wohingegen bei englischen (und hier nicht verdrehten Wortabfolgen) keiner nachweisbar war. Interessanterweise konnte ein verstärkter Zusammenhang zwischen den Einerstellen und der Performanz im Deutschen sowie der Zehnerstelle und der Performanz bei den englischsprachigen Probanden beobachtet werden. Da verbal betrachtet im Deutschen die zweite Stelle zuerst präsentiert wird (drei-und zwanzig).

Die Ergebnisse machen es wahrscheinlich, dass verbale Repräsentationsmechanismen eine Rolle spielen, auch wenn die Aufgabe selbst non-verbal ist (Nuerk *et al.* 2005a).

Beim Übergang auf dreistellige Zahlen ist ebenfalls davon auszugehen, dass für die Größendiskriminierung der Zehner- und Einerstelle eine wichtige Rolle zukommt. Da auch hier der Distanz- und Kompatibilitätseffekt von diesen abhängig ist. Die Wertigkeit der Hunderterstelle alleine spielt v.a. dann eine Rolle, wenn die folgenden Ziffern sich in keiner Weise unterscheiden (844 vs. 644). Ansonsten verliert der Hunderterdistanzeffekt an Bedeutung, wenn die Zehner- und Einerstelle zur Beantwortung der Aufgabe eine größere Rolle einnimmt (844 vs. 845) (Huber *et al.* 2013).

Die Entwicklung der Zahlenverarbeitung ist nicht sprachspezifisch, wird aber durchaus durch die sprachspezifischen Eigenheiten moduliert. Wobei diese Beeinflussung gerade bei Sprachen mit verdrehter verbaler Zahlenabfolge im Vergleich zu den arabischen Ziffern deutlicher ausfällt (Klein *et al.* 2013).

Aus pädagogischer Sicht stellt gerade deshalb das Erlernen des Hunderterraumes eine Hürde dar (Grevsmühl 1995). Eine anschauliche Herangehensweise wird in vielerlei Hinsicht durch entsprechendes Lehrmaterial versucht. Hierbei stehen häufig visuell-räumliche Ansätze im Vordergrund. Diese müssen jedoch teilweise eigens hierfür vom Schüler erlernt werden da sie nicht selbsterklärend sind und somit eine weitere Lernherausforderung darstellen können. Zudem kommt gerade im Hunderterraum die Diskrepanz zwischen verbaler Verarbeitung und räumlicher Vorstellung zum Tragen. Welches neuronale Substrat jedoch genau in dieser Hinsicht von Bedeutung ist bleibt bislang unklar.

2.1.2.6 Arbeitsgedächtnisfunktion und Zahlenverarbeitung

Die Involvierung der Subkomponenten des anerkannten Arbeitsgedächtnismodells von Baddeley 1992 unterliegt bei der Verarbeitung von Zahlen spezifischen Gegebenheiten. Der Zahlenverarbeitung kommt hier eine besondere Rolle durch die multimodalen Repräsentationswege zu (Knops *et al.* 2006). Wie bereits erwähnt, wird das Arbeitsgedächtnismodell in drei funktionelle Teile gegliedert. Diese drei Komponenten sind die phonologische Schleife, der visuell-räumliche Notizblock sowie die zentrale Exekutive. Diese kann wiederum in automatische Kontrollfunktionen und Aufmerksamkeitsfunktionen untergliedert werden (Baddeley 2003b). Die phonologische Schleife wird hier in einen phonologischen Speicher und Rehearsalprozesse untergliedert. Aus der Studie von Knops *et al.* geht hervor, dass auch averbale semantische Inhalte bei einer verbalen Arbeitsgedächtnisaufgabe mit Zahlen eine Rolle spielen (Knops *et al.* 2006). Die Aktivierung im HIPS (Größenrepräsentation) wurde hier nicht nur durch die Größenverarbeitung, sondern auch durch Stimuluseigenschaften und spezielle Aufgabenanforderungen moduliert. Dies bedeutet im Umkehrschluss auch, dass die Anwendung numerischer Aufgaben für die Evaluierung phonologischer Arbeitsgedächtnis-komponenten fraglich ist, da immer eine semantische Größenrepräsentation mit involviert ist.

Auch bei der Transcodierung der Formate von arabischen Ziffern zu Zahlwörtern - und umgekehrt - konnten spezielle Arbeitsgedächtnisanforderungen evaluiert werden (Imbo *et al.* 2014). Insbesondere im Hinblick auf die Transkodierung mehrstelliger Zahlen. Die Fehlerrate

dieses Prozesses steht im Zusammenhang mit sprachbedingten Problemen, hier v.a durch den bereits erwähnten Umkehreffekt der Zahlenabfolge (23, drei-und zwanzig). Die Performanz bezüglich einer Transkodierung von der auditiven zur schriftlichen Form hat bei holländischsprachigen Probanden (verdrehte Zahlensprache) zu einer erhöhten Rate von Inversionsfehlern gegenüber dem französischsprachigen (nicht verdrehte Zahlensprache) Kollektiv geführt. Durch eine Regressionsanalyse konnte gezeigt werden, dass die Sprache der einzige Prädiktor für Inversionsfehler war (auditiv: 46; schriftlich: 64). Wohingegen Arbeitsgedächtniskomponenten die Prädiktoren für allgemeine Transkodierungsfehler waren (auditiv: 46; schriftlich: 56).

Auch entsprechend der Darbietungsart werden unterschiedliche Komponenten des Arbeitsgedächtnisses involviert (Macizo & Herrera 2011). Es wurde der Kompatibilitätseffekt für zweistellige Zahlen hinsichtlich spezieller Arbeitsgedächtnisprozesse untersucht. Die Zahlen wurden als arabische Ziffern und Zahlwörter (spanisch ohne Inversionseffekt) dargeboten. Die Probanden mit einem starken Kompatibilitätseffekt hatten einen geringen operationalen Arbeitsspeicher. Die Probanden, die beim Vergleich der Zahlwörter hauptsächlich die Dekaden fokussierten, hatten ebenfalls eine geringe operationale Arbeitsspeicherkapazität.

Grundsätzlich kann so von einer sich überlappenden Involvierung der Arbeitsgedächtniskomponenten in räumlichen als auch numerischen Aufgaben ausgegangen werden.

2.1.2.7 Kortikale Aktivierungsmuster der Zahlenverarbeitung

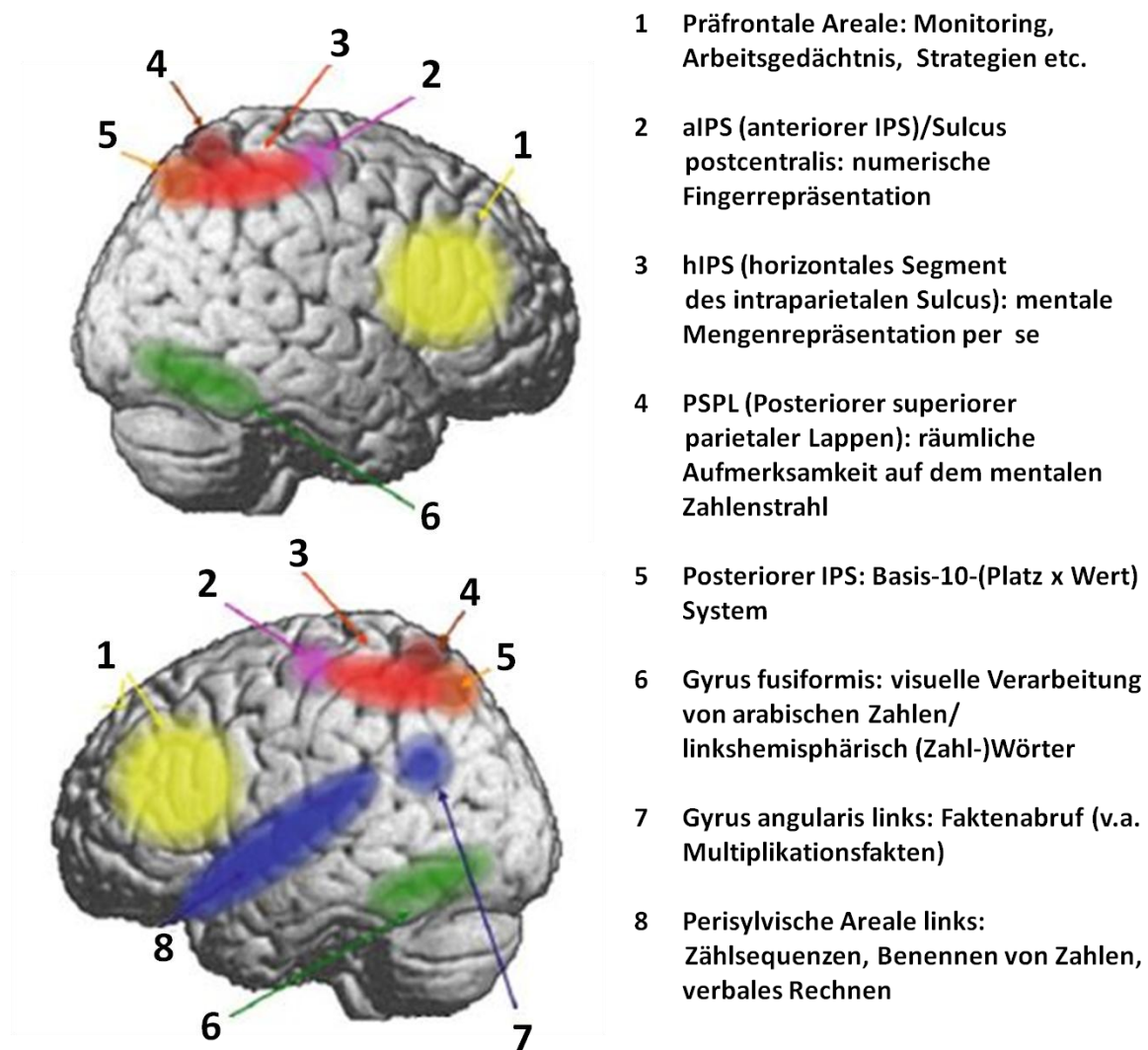


Abb. 4 : Übersicht der kortikalen Aktivierungsmuster der Zahlenverarbeitung, basierend auf dem Triple-Code Model von Deheane und Cohen 1995, modifiziert nach Schneider F, Fink GR (Hrsg.) „Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie“ (2013), Kapitel: Zahlenverarbeitung und Rechnen, Nuerk HC, Klein E S.444-453 (Schneider & Fink 2013)

Die zuvor getroffenen Aussagen über unterschiedliche Verarbeitungsprozesse, numerische Information betreffend, spiegeln sich auch in unterschiedlichen kortikalen Aktivierungsmustern wieder. Nach dem Modell von S. Deheane, soll es einen gemeinsamen Repräsentationsweg für Quantitäten, unabhängig ihrer Darstellungsart geben. Mitunter haben die starken Pa-

ralleren der behavioralen Daten für die Verarbeitung symbolischer und nicht-symbolischer Quantitäten zu dieser Annahme geführt.

Die Verarbeitung von Größen unabhängig ihrer Darstellungsart, inbegriffen numerischer und nicht-numerischer, wird v.a. dem IPS beidseits zugeschrieben. Hierbei wurde häufig eine Rechtslateralisierung beobachtet. Insbesondere soll der horizontale IPS an dieser Prozessierung von Größen im Allgemeinen beteiligt sein. Ergänzend hierzu konnte eine dem bilateralen anterioren IPS zugeordnete spezielle Funktion der Größeneinordnung von Zahlensymbolen zugeschrieben werden (Vogel *et al.* 2013). Allerdings wurde gezeigt, dass bei der isolierten Betrachtung von Zahlensymbolen, ohne deren semantische Einordnung bezüglich ihrer Größe, der linke Gyrus angularis eine bedeutende Rolle spielt. Dieser ist auch an der Prozessierung von Buchstaben beteiligt, wobei insbesondere der ventrale GA stärker durch die Präsentation von Zahlen als durch Buchstaben aktiviert wird.

Die Aktivierung des linken GA steht ebenfalls im Zusammenhang mit den mathematischen Fähigkeiten erwachsener Individuen. Eine verstärkte Aktivität des linken GA konnte bei Probanden mit vergleichsweise höherer mathematischer Kompetenz, insbesondere Multiplikationsaufgaben betreffend, beobachtet werden. Es liegt nahe anzunehmen, dass dieser Zusammenhang durch die verstärkt automatisierte linguistisch betonte Verarbeitung der Zahlensymbole zustandekommt und durch den Abruf mathematischen Faktenwissens (Grabner *et al.* 2007).

Die Repräsentation der visuellen Zahlensymbole wird u.a dem occipitotemporalen Übergang (Gyrus fusiformis) zugeschrieben. Dieser kann in diesem Zusammenhang als Teil des assoziativen Verarbeitungsweges u.a für die semantische Einordnung der Schriftsprache angesehen werden.

Funktionelle MRT Studien, die gezielt die Zahlenverarbeitung im Kindesalter untersuchen sind bislang unterrepräsentiert. Grundsätzlich ist die Übertragung der Ergebnisse von adulten Probanden auf Kinder nicht ohne weiteres möglich. Da von zugrundeliegenden entwicklungsbedingten Veränderungen in der Zahlenverarbeitung auszugehen ist. Es wird vermutet, dass es zu einer zunehmenden Vernetzung der nicht-symbolischen Größenrepräsentation mit der symbolischen kommt. Somit zu einer effizienteren semantischen Zuordnung eines Zahlensymbols zu seiner Bedeutung, im Sinne einer verstärkten Integration der abstrakten numerischen Repräsentation (siehe Abb. 3).

Die Fähigkeit zur Größendiskrimination ist allerdings bereits vor dem Spracherwerb vorhanden. Dies konnte bei Kindern im Alter von bereits wenigen Monaten (Cantlon *et al.* 2009) gezeigt werden.

Während der Verarbeitung von nicht-symbolischen numerischen Größendifferenzen hat sich eine bilaterale Aktivierung des IPS bei Erwachsenen ebenso gezeigt wie bei Kindern im Alter von vier Jahren (Cantlon *et al.* 2006). Hierzu wurde eine Adaptationsaufgabe mit wechselnden numerischen Größen verwendet, die zur Diskrimination der kortikalen Repräsentation von Größenveränderungen diente. Ebenso konnte die rechtsparietale Gehirnaktivierung bei drei Monate alten Kindern während einer Größenvergleichsaufgabe nachgewiesen werden. Die Kontrollaufgabe, die Veränderungen der Objektidentität zum Inhalt hatte, rief jeweils eine linksseitige Aktivierung des temporalen Kortex hervor. Was die Spezifität des Parietalkortex zur numerischen Einordnung von Objekten (z.B. Anzahl von Punkten) im Vergleich zu deren Einordnung als Objekt an sich (Hund vs. Katze) zeigt.

Die Verarbeitung von arithmetischen und linguistischen Prozessen ist bei Erwachsenen (bzw. sprachkompetenten Individuen) linkslateralisiert. Jedoch ist diese nicht denselben Hirnarealen zuzuordnen. Es konnte eine Korrelation zwischen der Aktivierung des linken sulcus temporalis superior während der Sprachprozessierung und der Aktivität des linken IPS während arithmetischer Aufgaben erkannt werden. Diese Korrelation impliziert die Annahme, dass das Erlernen der Zahlensymbole zu einer Verschiebung der Präsentation von „Anzahlen“ nach links führt, entsprechend des linkslateralisierten linguistischen Systems (Nieder & Dehaene 2009). Und somit eine Vorhersage für die Stärke der Lateralisierung der Zahlenverarbeitung, entsprechend der Lateralisierung des linguistischen Systems erlaubt.

Eine weitere Erkenntnis bezüglich der Weiterentwicklung im Prozessierungsvorgang numerischer Größen mittels Zahlensymbolen konnte anhand einer Trainingsstudie mit Affen gemacht werden. Den Affen wurde beigebracht, unterschiedliche Anzahlen von Objekten dem entsprechenden Zahlensymbol zuzuordnen. Also einen semantischen Inhalt der initial bedeutungslosen Symbole zu erstellen. Hierbei wurde festgestellt, dass im präfrontalen Kortex Neurone vorhanden sind, denen eine spezifische Rolle bezüglich der Assoziation von numerischen Größen und deren dazugehöriger Zahlensymbole zukommt. Die Aktivität des IPS hat hierbei insgesamt nur eine untergeordnete Rolle gespielt (Nieder & Dehaene 2009).

Beim Menschen geht man davon aus, dass es eine Art unspezifische frontale Verarbeitungs-komponente für Zahlen gibt. Genauer wird diese dem dorsolateralen Präfrontalkortex (DLPFC) beidseits zugeschrieben. Hier sollen strategisches Wissen über Rechenprozeduren, sowie Planungsprozeduren eine Rolle spielen. Diese Komponente wird zwar als notwendig jedoch nicht als spezifisch für die Zahlenverarbeitung betrachtet (Nieder & Dehaene 2009).

Ebenso konnte beim Menschen gezeigt werden, dass Zahlenvergleichsaufgaben, die v.a. den numerischen Rang der Zahlen, also deren Ordinalität beinhalten, ein parietofrontales Netzwerk beanspruchen (Nieder & Dehaene 2009a).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die abstrakte Größenverarbeitung unabhängig des dargebotenen Eingangsmediums dem IPS zuzuordnen ist (Ansari 2007); und hier insbesondere dem HIPS.

Die linguistisch betonte sowie eine auf dem Abruf von Faktenwissen beruhende Verarbeitung wird insbesondere dem linken GA zugeschrieben. Sie spiegelt u.a. eine weitgehend automatisierte, und wiederum von der Semantik entkoppelte Verarbeitung von Zahlen bei Individuen mit höheren mathematischen Fähigkeiten wieder. Da der semantische Abruf im Hintergrund steht. Deshalb spielt dieser auch eine besondere Rolle bei der selektiven Verarbeitung der Zahlensymbole in Form arabischer Ziffern.

Die in die Repräsentation von Zahlen involvierten frontalen und präfrontalen Areale sind je nach spezifischer Aufgabenanforderung Ausdruck von Exekutivfunktionen, erhöhter Aufmerksamkeit oder verstärkter Arbeitsgedächtnisleistung.

Die Assoziation von Größen mit den dazugehörigen Zahlensymbolen scheint als ontogenetisch als erstes Areal dem präfrontalen Kortex zuzuordnen zu sein und verschiebt sich im Zuge des Erlernens linguistischer Fähigkeiten zunehmend zu einer linkslateralisierten Verarbeitung parietal und occipitotemporal.

2.1.2.8 Geschlechtseffekte der Zahlenverarbeitung

Es gibt Ansätze die unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen für Zahlen bei Männern und Frauen postulieren. Insgesamt ist die Datenlage hierzu im Vergleich zur räumlichen Verarbeitung selbst weniger umfangreich. In einer Studie die unterschiedliche Aufgabentypen zur numerischen sowie nicht-numerischen Größeneinordnung beinhaltet ging hervor, dass die männlichen Probanden möglicherweise eine verstärkte räumliche Verarbeitungskomponente für Zahlen besitzen als die weiblichen. Dies wurde durch die räumlich numerischen Effekte wie den SNARC-Effekt, den Distanzeffekt und die Performanz der Zahlenstrahlaufgabe deutlich. Dadurch kann laut dieser Studie die Abbildungsschärfe für Größenunterschiede bei Männern besser ausfallen. Dies dürfte sich dann entsprechend der räumlichen Verarbeitungswege in unterschiedlichen parietalen Aktivierungen zwischen den Geschlechtern zeigen (Bull *et al.* 2013). Geschlechtsunterschiede, mathematische Fähigkeiten im Schulalter betreffend, konnten ebenfalls nachgewiesen werden. Prädiktoren für diese Leistungen waren in der Studie von Rosselli *et al.* ebenfalls hauptsächlich räumliche Aufgaben, wohingegen sprachliche Leistungen keine signifikante Vorhersagekraft hatten (Rosselli *et al.* 2009). Allerdings konnte eine Altersabhängigkeit für diese Geschlechtseffekte nachgewiesen werden. Wobei sich diese erst im älteren Probandenkollektiv gezeigt haben (13-bis 16jährige). Die Gruppe der 7 bis 10jährigen konnte keine signifikanten Geschlechtseffekte vorweisen. Zudem soll, ähnlich der räumlichen Verarbeitungsprozesse bei Männern, eine vornehmlich globale, sowie bei Frauen eine lokale bzw. gestückelte Größenrepräsentation im Vordergrund stehen. Dies bezieht sich vor allem auf mehrstellige Zahlen und wurde in der Studie von Pletzer *et al.* für zweistellige Zahlen untersucht. Die männlichen Probanden können dementsprechend die Zahl besser im Ganzen erfassen und einordnen. Wohingegen Frauen die Ziffern einer Zahl im Einzelnen betrachten. Wodurch wiederum der bereits erwähnte Kompatibilitätseffekt stärker zum Tragen kommt (Pletzer *et al.* 2013).

2.2 Hypothese

Gegenstand dieser Arbeit ist es, den Zusammenhang zwischen räumlicher und numerischer Verarbeitung im Kindesalter weiter zu beleuchten. Hierzu wird ein funktionelles MRT-Paradigma verwendet, welches eine mentale Rotationsaufgabe als Modell der räumlichen Verarbeitung auf der einen Seite und eine Aufgabe zur Größeneinordnung von Zahlen auf der anderen Seite in sich vereint. Hierbei ist von einer zumindest in Teilen übereinstimmenden Aktivierung neuronaler Netzwerke auszugehen, betrachtet man die Ergebnisse in der Literatur (Dehaene *et al.* 2003). Ebenso kann aufgrund der speziellen Aspekte der Verarbeitung mehrstelliger Zahlen und hier insbesondere der zweistelligen Zahlen im deutschsprachigen Raum von funktionellen Besonderheiten ausgegangen werden. Diese könnten verdeutlichen welche Aspekte beim Umgang mit zweistelligen Zahlen eine bedeutende Rolle spielen. Die Hypothesen die in vorliegender Arbeit bearbeitet werden sind somit folgende:

- 1 Die neuronalen Netzwerke für mentale Rotation und Zahlenverarbeitung im Kindesalter überschneiden sich.
- 2 Die spezielle Rolle der Verarbeitung zweistelliger Zahlen drückt sich durch ein gesondertes neuronales Aktivierungsmuster aus - welches sich vom alleinigen semantischen Komplex tätszugewinn mehrstelliger Zahlen abhebt.

3 Material und Methode

3.1 fMRT-Messung

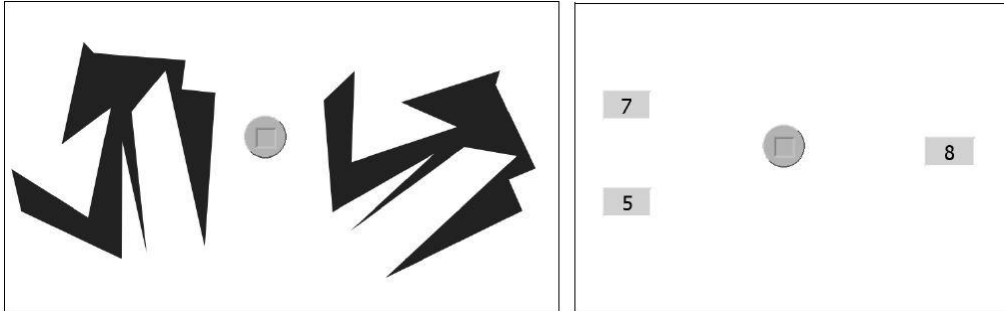


Abb. 5 : Exemplarische Darstellung der verwendeten Stimulustypen

In der vorliegenden Studie wurden zwei unterschiedliche Aufgabentypen miteinander kombiniert. Zum einen wurde die räumliche Vorstellungskraft anhand einer mentalen Rotationsaufgabe mit Polygonen getestet. Zum anderen erfolgte die Überprüfung numerischer Kompetenz anhand einer Zahlenaufgabe zur Größeneinordnung.

Im Hinblick auf die Vermeidung expertiseabhängiger Stimuli, wie etwa Gesichtern oder deutscher Schriftzeichen, wurden zweidimensionale Polygone für die mentale Rotationsaufgabe verwendet. Diese wurden von Herrn Dr. René Liesefeld (Universität des Saarlandes, psychologische Fakultät) zur Verfügung gestellt und sind nach Vorlage von Vanderplas und Garvin (Vanderplas & Garvin 1959) ausgeschnitten und digital überarbeitet worden.

Die Zahlen zum Größenvergleich wurden über eine zufällige Zahlengenerierung erstellt (Dr. Christoph Krick, Universitätsklinikum des Saarlandes, Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie).

3.1.1 Mentale Rotation

Als etabliertes Verfahren zur Untersuchung des räumlichen Vorstellungsvermögens wurde ein mentaler Rotationstest verwendet. Es musste beurteilt werden, ob es sich bei den jeweils abgebildeten Figuren um zueinander spiegelbildlich dargestellte Objekte handelt oder nicht. In Abhängigkeit der Winkeldisparitäten, in der die Figuren zueinander dargestellt wurden ergaben sich drei Schwierigkeitsgrade, bei jeweils 0, 60 und 120 Grad. Die Drehrichtung, in der sich die Polygone voneinander unterschieden war immer entlang des Uhrzeigersinnes. Die

Kontrollbedingung entsprach der Condition, in der sich die Figuren nicht voneinander unterschieden, und der Winkel zwischen ihnen 0 Grad betrug. Insgesamt wurden sechs verschiedene Polygontypen gewählt. Es wurde die Reaktionszeit sowie die Fehlerrate der einzelnen Probanden bei dieser Aufgabe miterhoben.

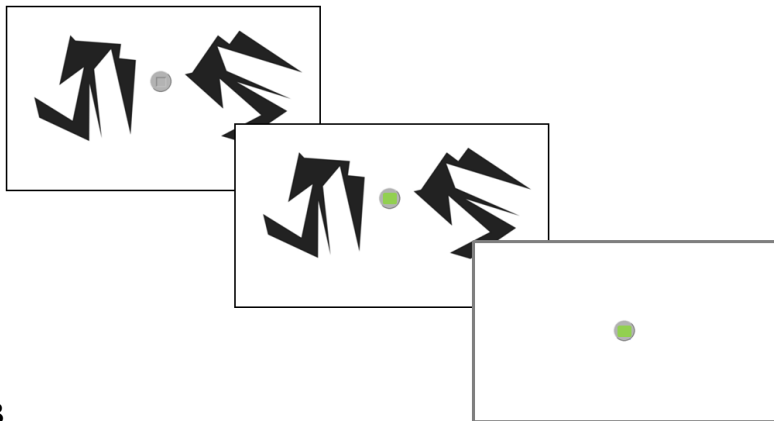
3.1.2 Zahlenverarbeitung

Die Verarbeitung numerischer Information wurde anhand eines Tests zur Abschätzung von Zahlengrößen mittels arabischer Ziffern untersucht. Hierbei sollte beurteilt werden, ob eine vorgegebene Zahl mit ihrer Größe zwischen zwei Referenzzahlen liegt oder nicht. Dabei ergaben sich unterschiedliche Schwierigkeitsgrade entsprechend dem Zehnerbereich, in dem sich die Zahlen befanden, jeweils entsprechend dem ein-, zwei- und dreistelligen Bereich. Hierbei wurden ebenfalls die Fehlerrate sowie die Antwortgeschwindigkeit miterhoben. Grundsätzlich ging es hierbei um die Evaluation von cerebralen Aktivierungen, die in die Extraktion numerischer Information involviert sind. Um einen symmetrischen Versuchsaufbau zu gewährleisten wurden hier entsprechend der mentalen Rotation drei Schwierigkeitsgrade gewählt. Eine klassische Kontrollbedingung ist in diesem Fall nicht vorhanden. Dennoch können mit der Bildung gezielter Kontraste, die die Informationsextraktion widerspiegeln, eindeutige Ergebnisse erzielt werden. Grundsätzlich ist jedoch von einer spezifischen Rolle der Verarbeitung von Zahlen im einstelligen Bereich auszugehen. Deren Bedeutung ist weitestgehend so gut erlernt, dass die neuerliche Imagination der Semantik eine untergeordnete Rolle spielt. Ebenfalls ist die verbale Komponente deutlich von der Verarbeitung mehrstelliger Zahlen abzugrenzen. Die Zahlen wurden in vertikaler Anordnung dargeboten, um eine Konfundierung mit dem klassischen SNARC-Effekt (s.o.) zu vermeiden. Der SNARC-Effekt kann auch in vertikaler Anordnung auftreten. Jedoch wurden in einer Kontrollstudie, die das selbe Paradigma verwendet und die Zahlen in einer zwischengeschalteten Trainingseinheit horizontal darbietet, sowohl vergleichbare funktionelle als auch behaviorale Daten erhoben.

3.1.3 Aufbau der Experimentalphasen

Die fMRT Studie wurde als event-related mit LabVIEW programmiert. Die Zahlen und Polygone wurden initial zufällig gewählt und im Folgenden bei jedem Probanden in jeweils selbem Ablauf dargeboten. Jedes Trial wurde für jeweils drei Sekunden gezeigt. Die Dauer der Intertrialintervalle wurde nach Gauss'scher Verteilung um einen Mittelwert von 6,525 Sekunden mit einer Abweichung von +/- einer Sekunde gewählt. Die Antwort der Probanden konnte jeweils ab Beginn eines Trials bis zum Beginn des nächsten Trials gegeben werden. Insgesamt wurden 144 Trials verwendet. Jede Condition kam insgesamt 24 mal vor. Jeder Polygontyp kam vier mal pro Condition vor. Davon waren 50% Matches und 50% Non-Matches. Die Zeit der Versuchsmessung betrug damit 15,7 min. (939623ms).

A



B

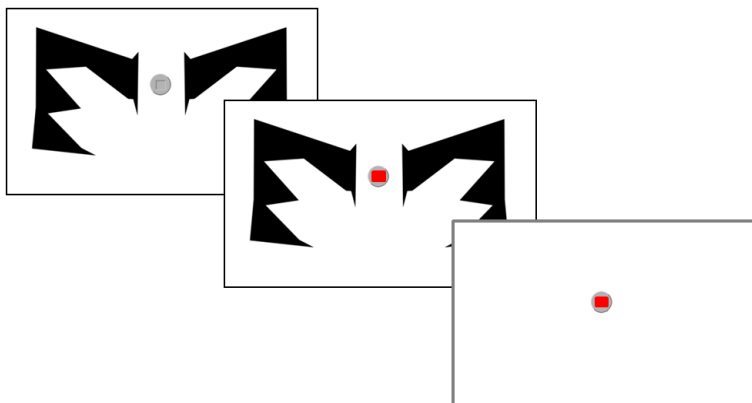


Abb. 6 : Exemplarische Darstellung der Trialabfolge für A) Mentale Rotation und B) Zahleneinordnung

3.1.4 Zusatzmessungen im Kernspin

Zu Beginn der Messungen wurde eine Sequenz zur Erfassung der Feldinhomogenitäten „grey-field inhomogenities“ durchgeführt, die der späteren Aufbereitung der Daten zur Verfügung stehen sollte, allerdings nicht benötigt wurde. Zur anatomischen Messung des gesamten Kopfes wurde eine T1-gewichtete MPRAGE-Sequenz verwendet. Hierbei wurden folgende Parameter verwendet: TR 1.9s, TE 2.13ms, TI 900ms, Flip-Winkel 9°, Matrix 256x256 Pixel, Voxelgröße 0.94mm³, Schichtdicke 0.9mm. Die gesamte Messzeit im MRT betrug somit für jeden Probanden 20 min (T1mprage: 4,26min).

3.1.5 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden am Institut für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie des Universitätsklinikums des Saarlandes durchgeführt. Diese wurden an einem 3Tesla MRT-Gerät (Skyra; Siemens) durchgeführt. Es wurde eine 20 Kanal-Kopfspule verwendet. Die eigentlichen Messungen wurden durchgeführt, nachdem der Localizer zur Anpassung aller folgenden Messfelder erstellt wurde.

Allem voran wurde bei jedem Probanden, der eine Brille trug der Visus mit eigens für diesen Zweck ausgeliehenen MRT-tauglichen Kunststoffgläsern korrigiert.

Die Trials wurden über einen Versuchs-PC auf einen Bildschirm an der Kopfseite des MRT-Gerätes projiziert. Die Probanden hatten über einen Spiegel, der auf der Kopfspule angebracht wurde, Sicht auf den Bildschirm. Jeder Proband hatte jeweils einen Antwortbutton in jeder Hand. Es wurde vorher die Antwortseite der Hand, mit der „ja“ oder „nein“ gedrückt werden sollte, festgelegt. Dies erfolgte in streng abwechselnder Reihenfolge, um eine Konfundierung der Ergebnisse mit der Seite der Handbewegung zu verhindern. Die Antwortbuttons waren über Lichtleiterkabel mit dem Versuchs-PC verbunden. Die Probanden hatten über die Richtigkeit ihrer Antworten Feedback über den Fixpunkt in der Mitte des Screens. Dieser wechselte entsprechend des Matchings bzw. Mismatches der Antwort seine Farbe: rot=falsch, grün=richtig.

Der Versuchs-PC war über eine Trigger-Box mit dem MRT-Gerät verbunden. Somit starteten die Versuchstrials automatisch nach beginn der EPI-Sequenz, nachdem die ersten 4 Schichten der Messung verworfen wurden. Mit dem Ende des letzten Trials endete auch die EPI-Sequenz zur Messung der funktionellen Daten.

Die behavioralen Daten - die Fehlerrate und die Reaktionszeit bis zur Antwortgabe - wurden automatisch im Anschluss an die Messung auf dem Versuchs-PC tabellarisch gespeichert.

3.1.6 Statistik und Aufbereitung der Daten

MRT-MESSUNG: Die über die fMRT-Messung erhobenen Daten wurden in Form von DICOM-Bilddateien als Grundlage für die statistische Auswertung herangezogen. Pro Einzelmessung (Scan) während des Versuchsablaufes wurden 30 Schichten erstellt. Die Erstellung der Schichten erfolgte in abwechselnder Reihenfolge. Wobei zunächst alle Schichten mit gerader Anzahl und daraufhin im Anschluss alle ungeraden gemessen wurden. Insgesamt wurden 434 Scans pro Messung erstellt. Hiervon wurden die ersten 4 Scans (Pre-Scans) für die weitere statistische Auswertung nicht verwendet. Somit flossen 430 Scans in die weitere Auswertung ein (Preprocessing).

PREPROCESSING: Im Rahmen des Preprocessing erfolgte die räumliche und zeitliche Korrektur der erstellten Dateien. Die zeitliche Korrektur wurde anhand der Schichtanzahl einer Messung mit 30 slices, einer TR von 2200ms und unter Verwendung der ersten Schicht als Referenzschicht durchgeführt. Die Aquisition-time (TA) betrug hierbei 2,127s und entsprach demnach der TR- ($1/30TR$). Also der Dauer einer Hirnmessung unter Abzug einer Schichtmessung.

Die Bewegungskorrektur der bereits zeitlich korrigierten Dateien erfolgte unter Anpassung an ein Mittelwert-Bild. Der hierbei erstellte File mit den genauen Daten der räumlichen Verschiebung in alle drei Koordinaten wurde beibehalten. Diese dienten für die spätere statistische Auswertung als Regressoren. Wobei alle Aktivierungsareale, die exakt mit der Bewegung zu korrelieren waren verworfen wurden.

Die Glättung der zeitlich und räumlich normalisierten Bilder erfolgte mit einem Gauß-Glättungfilter von 8x8x8mm Radius.

DATENANALYSE: Vor der Datenanalyse wurde eine Tabelle mit den Stimuli-Conditions und deren jeweils zugehöriger Onsetime zur weiteren statistischen Auswertung erstellt. Die Auswertung der fMRT-Daten erfolgte mit der Software SPM8 unter Verwendung der Onsetzeiten. Die First-level-Statistik auf Einzelkopfebene beinhaltete ein Modell der Aktivierungen entsprechend der Stimulationszeitpunkte pro Bedingung. Zusätzlich wurden in das Modell die Effekte von Bewegungsartefakten, welche aus dem Preprocessing der Motion-Correction er-

rechnet wurden, als Regressoren (3 x Translation, 3 x Rotation) eingefügt und nachfolgend durch Multiplikation mit Null entfernt.

Die aus dem Modell abgeleitete Designmatrix beinhaltet die angenommene HRF für jede Condition zum jeweiligen Zeitpunkt unter Hinzunahme der 1. und 2. Ableitung der HRF als Regressor. Die Annahmen der Designmatrix wurden unter Erstellung von jeweils einer Beta-Datei (Schätzer in Form eines Bildes) pro Condition (HRF/1.Ableitung/2.Ableitung) mit den tatsächlichen Messdaten verglichen. Die Kontraste für die jeweiligen Conditions wurden anhand der Designmatrix unter Berücksichtigung der Regressoren gewählt. Im Folgenden wurde ein neues Bild für die jeweiligen gewählten Kontraste erstellt.

Im Rahmen der Second-Level Analyse erfolgte die Bildung von Kontrasten auf Gruppenebene. Hierzu wurden die generierten Daten der funktionellen Messung auf Einzelkopfebene auf ein Referenzvolumen in Form einer von SPM8 zur Verfügung gestellten „Gehirnmaske“ übertragen. Es erfolgte die Erstellung von Kontrasten die mentale Rotation und den Zahlenvergleich gesondert betreffend sowie zwischen den beiden Aufgabentypen. Ebenso wurden Conjunction-Analysen zur Berechnung von Arealen, die durch verschiedene Conditions gleichermaßen signifikant aktiviert werden, durchgeführt.

3.2 Versuchspersonen

Bei der durch die zuständige Ethikkommission der Ärztekammer des Saarlandes genehmigten Studie nahmen insgesamt 42 gesunde deutschsprachige Kinder im Alter von 10 bis 16 Jahren teil. Zehn der initial 42 Kinder konnten aufgrund von starken Bewegungsartefakten nicht mit in die funktionellen Auswertungen eingeschlossen werden.

Es haben letztlich 32 Probanden bei den MRT Messungen teilgenommen, deren Daten später auch verwendet werden konnten. Das Durchschnittsalter der Probanden lag hier bei 11,62 Jahren. 28 Probanden waren bereits auf einer weiterführenden Schule, 15 davon auf dem Gynasium und 13 auf einer Gesamtschule.

Ein Teil der Schüler wurde über öffentliche Veranstaltungen im Rahmen des Schulprogramms der Robert-Bosch-Gesamtschule rekrutiert. Die Gymnasialschüler waren größtenteils bereits Teilnehmer eines anderen Forschungsprojektes des UKS und erklärten sich zur Teilnahme an diesem Projekt bereit.

Alle Kinder nahmen freiwillig an der Forschungsarbeit teil und wurden vorher ausführlich über das Projekt aufgeklärt sowie über ihr Recht, jederzeit ohne Angabe von Gründen die Mitarbeit abubrechen. Die Erziehungsberechtigten unterschrieben vor der Teilnahme ihres Kindes einen Aufklärungsbogen sowie eine Einverständniserklärung bezüglich des Projektes.

3.3 Erhebung von Kovariaten

Anhand eines Fragebogens (siehe Anhang S.112) wurden relevante Persönlichkeitsmerkmale, das Selbstkonzept bezüglich eigener Leistungen in der Mathematik sowie erneut das räumliche und numerische Vorstellungsvermögen überprüft.

Die Erfassung von Persönlichkeitsmerkmalen erfolgte mit Hilfe eines Fragebogens, der ursprünglich durch die Arbeitsgruppe für Kinder-, Jugendlichen- und Familiendiagnostik der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie des Kindes- und Jugendalters der Universität zu Köln entwickelt wurde. Dieser ist für Jugendliche zwischen 11 bis 18 Jahren entworfen worden. Es wurden gezielt zwei Teilkomponenten des umfassenden Fragebogens ermittelt. Zum einen, um die im Kontext der Studie als relevant einzustufenden Aspekte zu erruieren. Und zum anderen, um den Test insgesamt in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen zu halten. Hierbei wurden die Subskalen für ängstlich depressives Verhalten und Aufmerksamkeitsprobleme erfasst.

Die Fragen zur Selbsteinschätzung und u.a. für objektivere Kriterien zu eigenen Problemen in Mathematik, wurden in abgewandelter Form aus Dyskalkulie-Fragebögen verwendet. Hierbei wurde sich angelehnt an den Rechenschwäche-Symptom-Katalog für Eltern des Marburger Zentrums für Lerntherapie sowie den Zwanzig-Fragen-Katalog für Dyskalkulie (Training nach der AFS- Methode (Stand 2001)). Zusätzlich wurden fünf kurze Rechenaufgaben dargeboten, bei denen der Proband angeben sollte, ob er die Aufgabe jeweils im Kopf oder lieber schriftlich lösen würde. Das Rechenergebnis wurde nicht verlangt.

Der Aufgabenteil zum räumlich numerischen Vorstellungsvermögen war in drei verschiedene Aufgabentypen unterteilt. Eine Zahnradaufgabe wurde in abgewandelter Form aus dem Mathematik-Rechentest für die 4.Klasse der Volksschule übernommen. Ein Test zur räumlichen Orientierung, der in seinem Aufbau Ähnlichkeit zum Drei-Berge-Versuch von Piaget und Inhelder (1971) aufweist, wurde in ebenfalls abgewandelter Form aus dem Zentralblatt für Didaktik der Mathematik übernommen (Grüßing 2002). Eine Zahlenstrahlaufgabe zur räumlichen Einordnung einer angegebenen Zahlengröße wurde in Anlehnung an den ZAREKI Test für Dyskalkulie in abgewandelter Form dargeboten.

Als weiterer allgemein anerkannter Faktor für die Quantifizierung der mathematischen Leistung wurde die Mathematiknote des jeweils letzten Schuljahreszeugnisses miterhoben.

Ebenfalls ist es hierdurch möglich, den Wert der Mathematiknote als Indikator für mathematisch bezogene Denkprozesse ggf. zu relativieren bzw. zu objektivieren.

4 Ergebnisse

4.1 Behaviorale Ergebnisse

4.1.1 Mentale Rotation

Wie zu vermuten war, brauchten die Probanden mit zunehmender Größe der Winkeldisparität mehr Zeit für die Antwortgabe. Das Diagramm zeigt die Reaktionszeit für die verschiedenen Conditions jeweils um einen Mittelwert mit Darstellung des jeweiligen Standardfehlers. Die Reaktionszeiten nehmen hier jedoch nicht linear zu. Die Differenz der Antwortzeiten nähert sich zwischen 60 und 120° im Vergleich zu 0° und 60° wieder etwas an.

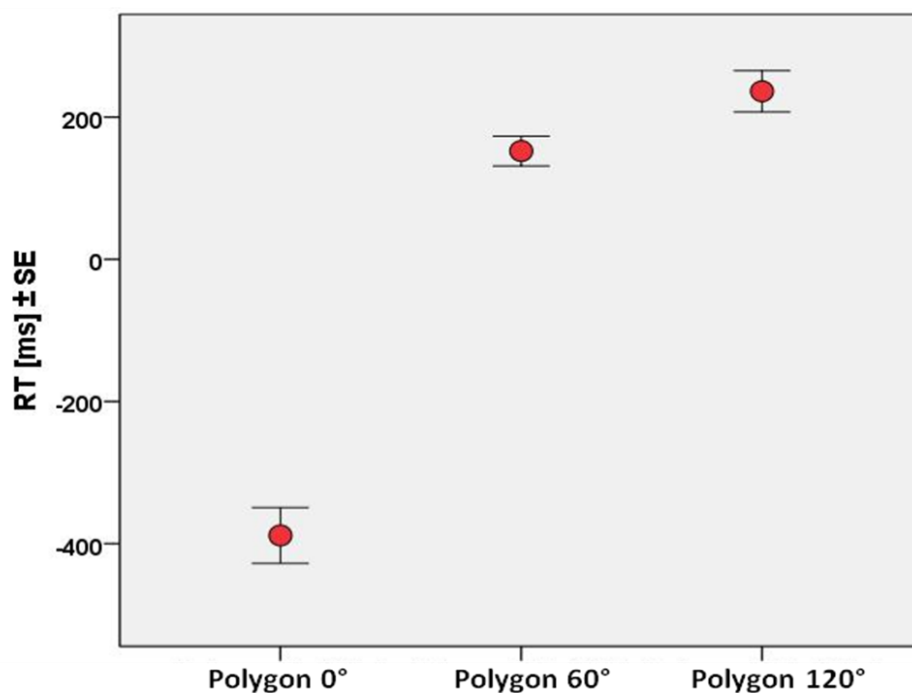


Abb. 7 : Darstellung der Reaktionszeit bis zur Antwortgabe mit zunehmender Winkeldisparität

Wie im folgenden Diagramm dargestellt, nimmt ebenfalls die Fehlerrate mit zunehmender Winkeldisparität zu. Auch hier sind die Mittelwerte mit den jeweiligen Standardfehlern dargestellt.

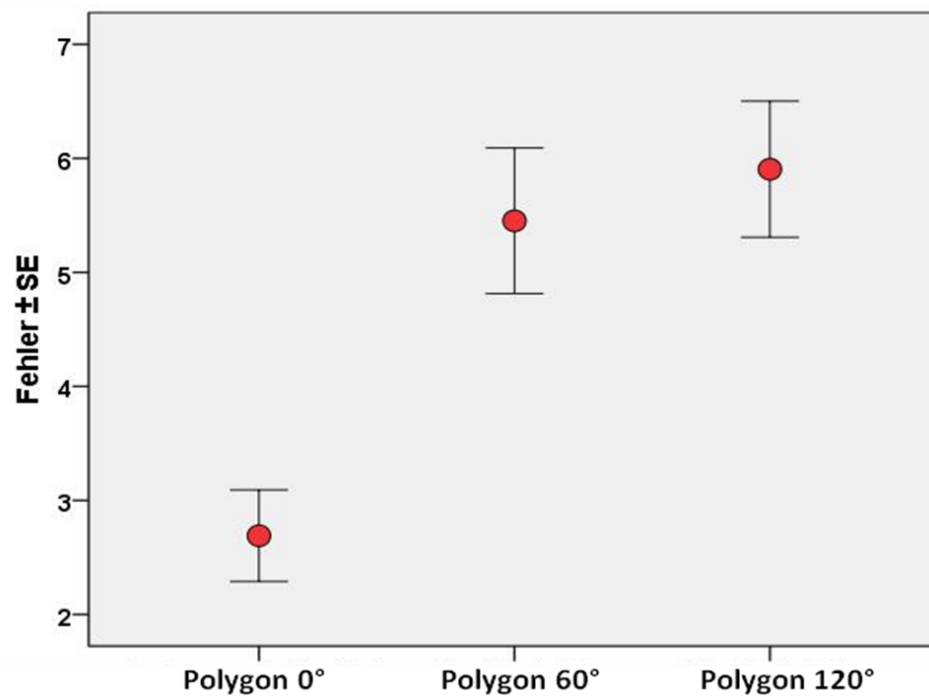


Abb. 8 : Darstellung der Fehlerrate mit zunehmender Winkeldisparität

4.1.2 Zahlenverarbeitung

Die Reaktionszeit zur Antwortgabe bei der Zahleneinordnung nimmt mit steigendem Zehnerbereich zu. Hier ist die Differenz zwischen zwei- und dreistelligen Zahlen insgesamt weniger ausgeprägt als zwischen ein- und zweistelligen Zahlen.

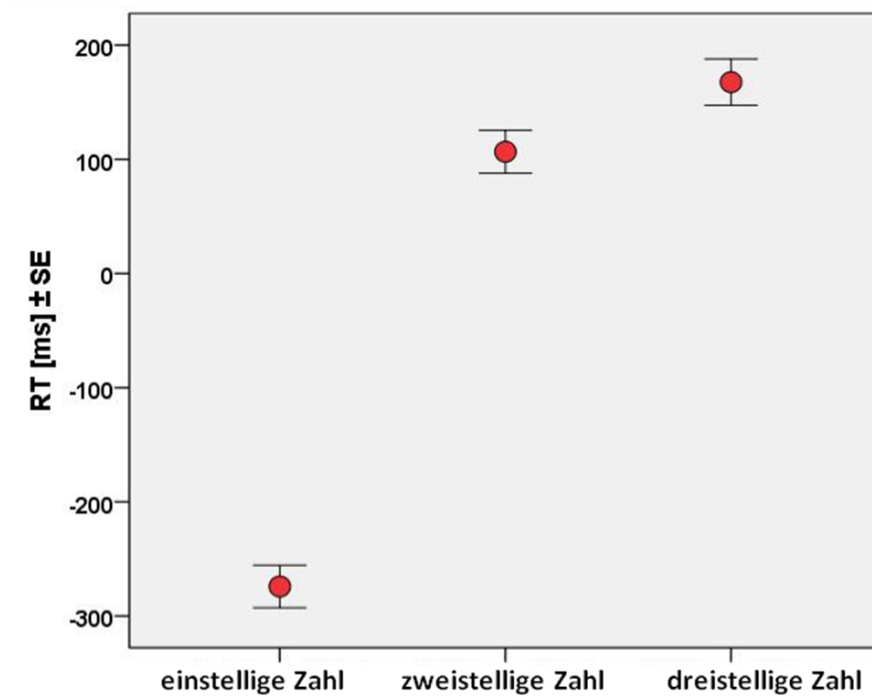


Abb. 9 : Darstellung der Reaktionszeit mit zunehmender Zahlengröße

Die Fehlerrate hingegen zeigt einen deutlichen Einschnitt, im Sinne einer Zunahme, beim Übergang vom ein - auf den zweistelligen Bereich. Im Folgenden ergibt sich wieder eine Abnahme der Fehlerrate beim Übergang auf den dreistelligen Bereich.

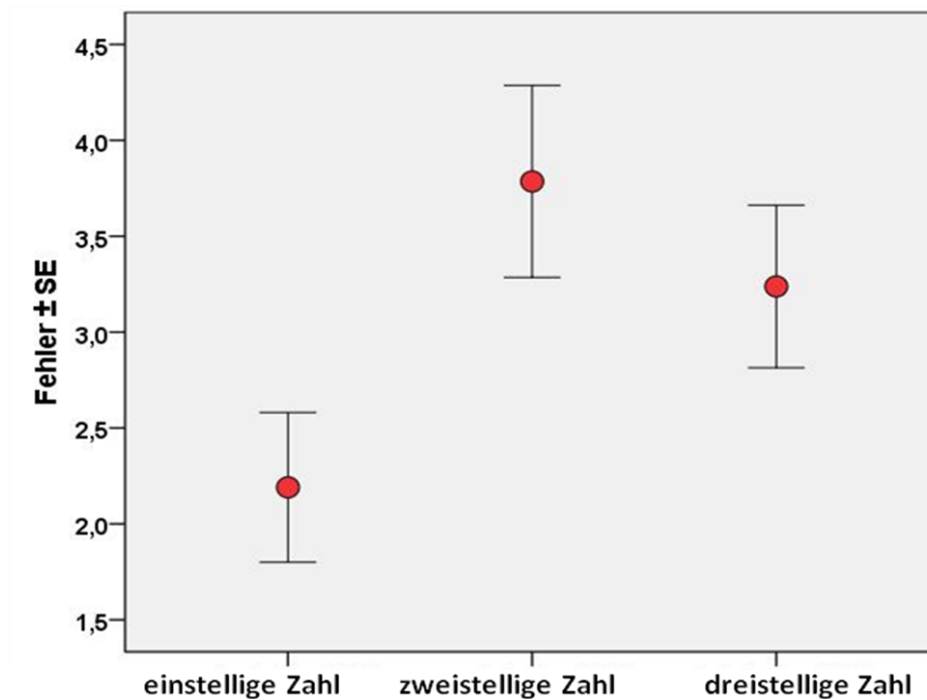


Abb. 10 : Darstellung der Fehlerrate mit zunehmender Zahlengröße

4.1.3 Ergebnisse durch die Erhebung der Kovariaten

Der angenommene Zusammenhang zwischen räumlichem Denken und Zahlenverarbeitung sollte sich auch in den behavioralen Daten der MRT-Messungen sowie in den Daten, die über den zusätzlich ausgehändigten Fragebogen erhoben wurden zeigen. Die Analysen wurden mit dem Statistikprogramm SPSS durchgeführt.

Zahlenstrahlaufgabe - Korrelation zu räumlichem Denken und Zahlenverarbeitung

Die bereits erwähnte Zahlenstrahlaufgabe (s.o) eignet sich gut, um die Fähigkeit eine Zahl räumlich zuzuordnen zu überprüfen und diese Ergebnisse in Relation zu den bereits gemachten Ergebnissen zu setzen. Die Aufgabe hatte die Besonderheit, dass der Zahlenstrahl jeweils unterschiedlich lang war. So mussten die Probanden die Zahlen immer in Relation zu ihrem vorgegebenen räumlichen Bereich einordnen. Hierdurch steigt die Komplexität der Aufgabe in gewisser Weise an und macht die relationalen Zusammenhänge der Zahlengröße vermehrt zum Gegenstand. Ein in diesem Zusammenhang zu erwartendes Ergebnis war die Korrelation der Fehlerrate der Zahlenstrahlaufgabe mit der Fehlerrate der fMRT-Aufgabe zur Zahleneinordnung. Im folgenden Diagramm ist dieser Zusammenhang deutlicher dargestellt. Die bivariate Korrelationsanalyse nach Spearman ist auf dem $p < 0.05$ Niveau für diesen Zusammenhang signifikant.

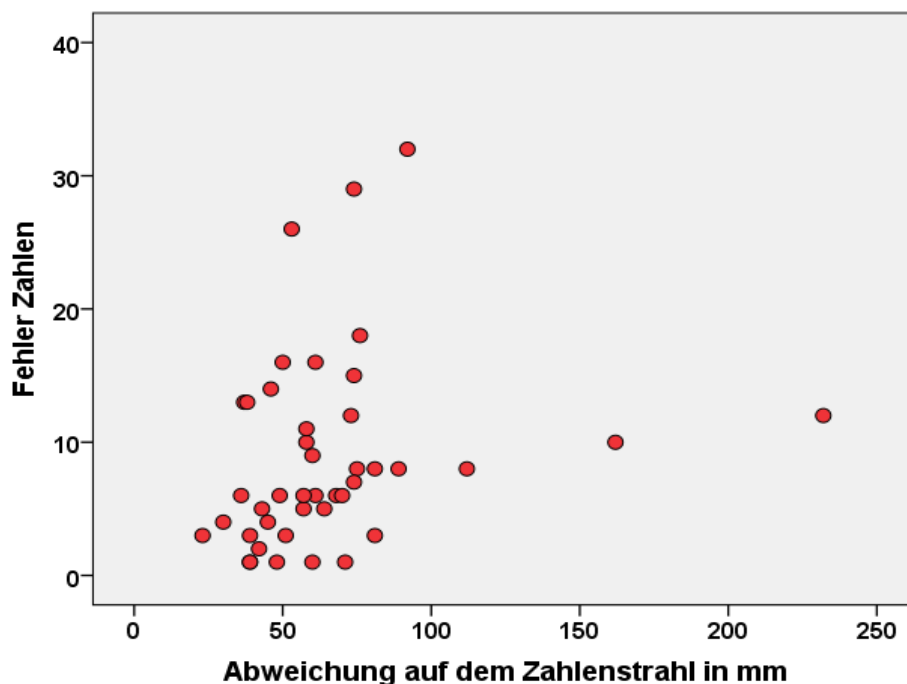


Abb. 11: Korrelation zwischen der Fehlerrate der Zahleneinordnungsaufgabe und den Abweichungen auf dem Zahlenstrahl; $p = 0.012$; $\rho = 0.385$

Die Korrelationsanalyse für die Fehlerrate beim räumlichen Denken und der bei der Zahlenstrahlaufgabe ist ebenfalls signifikant auf dem Niveau $p < 0.05$. Dies ist ein weiteres Ergebnis, dass die Komponente des räumlichen Denkens bei der Anforderung durch die Zahlenstrahlaufgabe verdeutlicht.

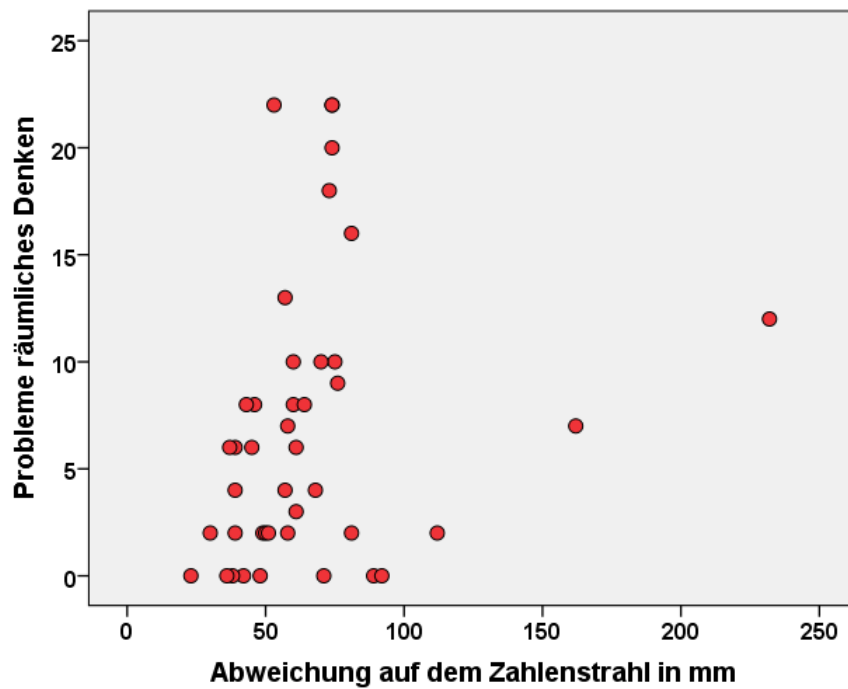


Abb. 12: Korrelation zwischen den Problemen beim räumlichen Denken und den Abweichungen auf dem Zahlenstrahl; $p = 0.02$; $\rho = 0.359$

Mentale Rotation – Korrelation zum räumlichen Denken und Zahlenverarbeitung

Die Probleme beim räumlichen Denken wurden über den Fragebogentest erfasst und anhand einer Skalierung, die auf der jeweiligen Fehlerrate der Antwortgaben beruht, dargestellt. Es zeigt sich, dass die Performanz der mentalen Rotationsaufgabe im MRT auf einem Signifikanzniveau von $p < 0.05$ mit den Problemen beim räumlichen Denken korreliert. Dieses Ergebnis war in Anbetracht der Annahme, dass mit der mentalen Rotation die Prozessierung räumlicher Information überprüft wird, zu erwarten.

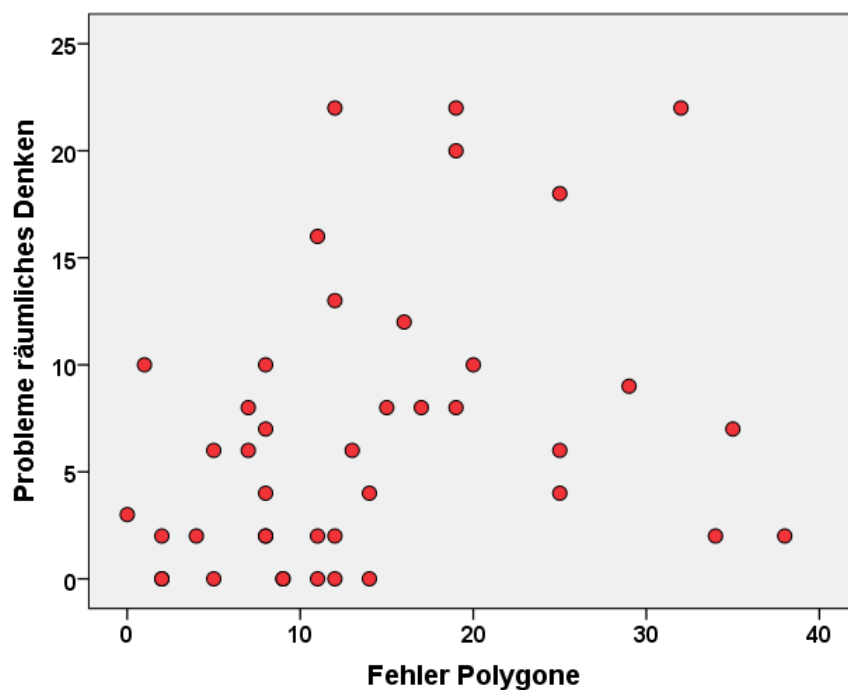


Abb. 13: Korrelation zwischen den Problemen beim räumlichen Denken aufgetragen gegenüber der Fehlerrate bei der Mentalen Rotation; $p = 0.014$; $\rho = 0.376$

Die Fehlerrate der mentalen Rotation korreliert hochsignifikant ($p < 0.01$) mit den Fehlern bei der Zahleneinordnung im MRT. Ein interessanter Aspekt ergibt sich bei der genaueren Betrachtung der Korrelation hinsichtlich des Zehnerbereiches, in dem sich die Zahlen befinden.

Hierbei wird deutlich, dass nur die Fehlerrate der zweistelligen Ziffern hoch signifikant mit der Fehlerrate der Polygonrotation auf dem Signifikanzniveau $p < 0.01$ korreliert. Für einstellige Zahlen wurde kein signifikanter Zusammenhang errechnet und für dreistellige Zahlen zumindest auf einem Schwellenwert von $p < 0.05$.

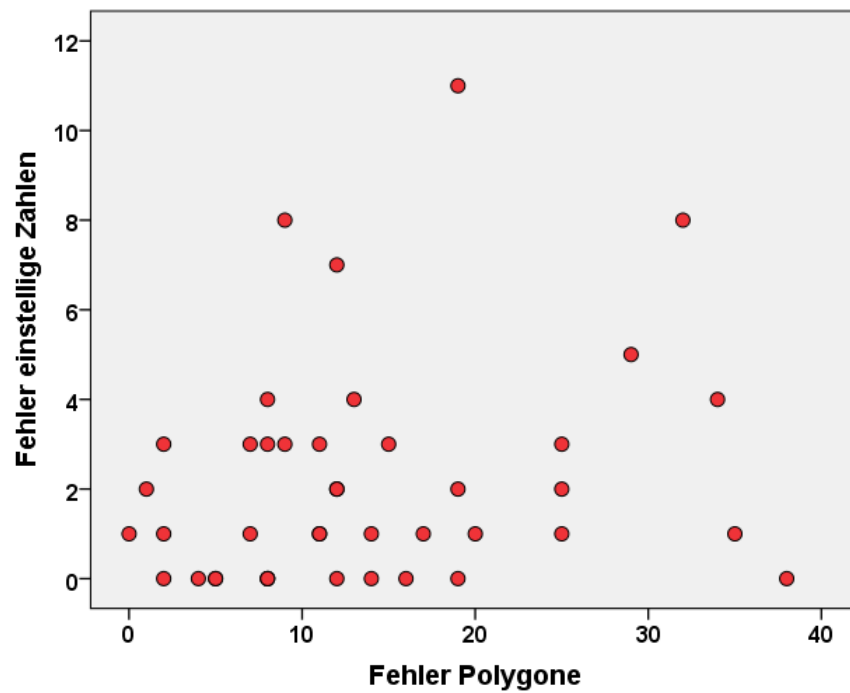


Abb. 14 : Korrelation zwischen der Fehlerrate bei der Einordnung einstelliger Zahlen gegenüber der Fehlerrate bei der Mentalen Rotation; $p = 0.156$, $\rho = 0.223$

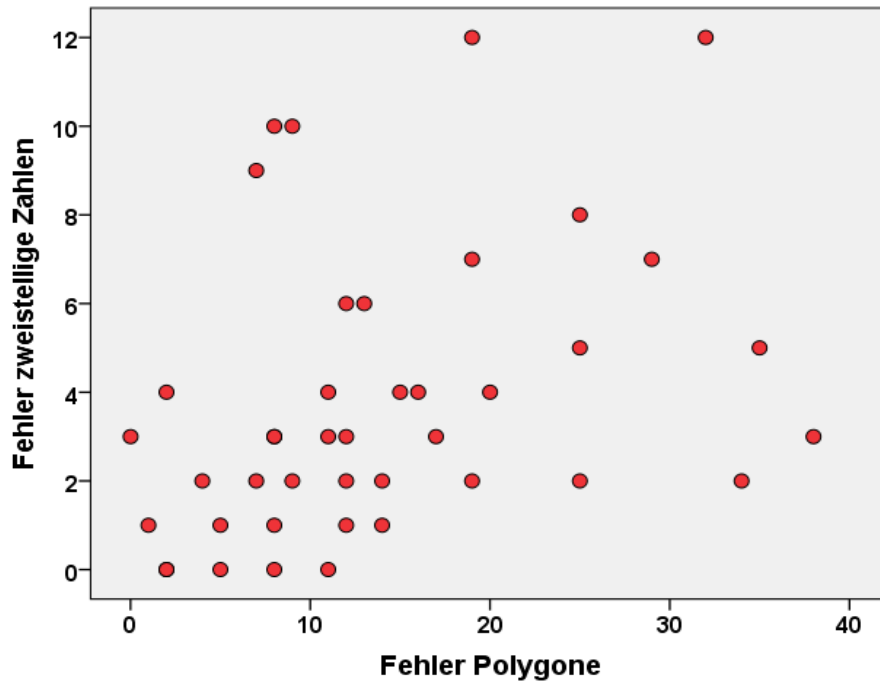


Abb. 15 : Korrelation zwischen der Fehlerrate bei der Einordnung zweistelliger Zahlen gegenüber der Fehlerrate bei der mentalen Rotation; $p = 0.004$; $\rho = 0.431$

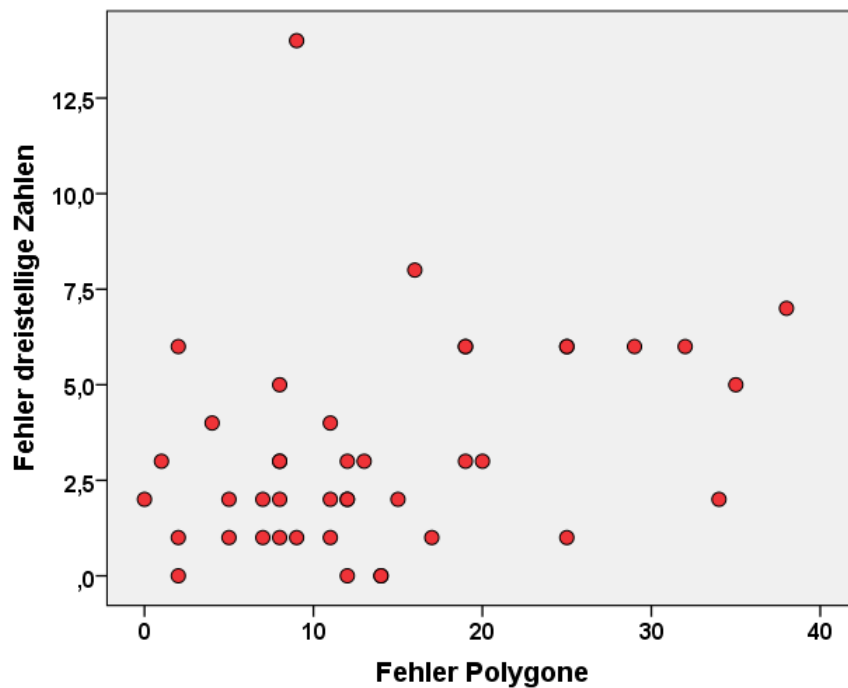


Abb. 16 : Korrelation zwischen der Fehlerrate bei der Einordnung dreistelliger Zahlen gegenüber der Fehlerrate bei der mentalen Rotation; $p = 0.028$; $\rho = 0.339$

Mathematiknote als Indikator für arithmetische Leistungen in Korrelation zur Performanz des MRT-Paradigmas

Im Folgenden wurde die Mathematiknote als Indikator für die mathematischen Leistungen mit der Performanz der Aufgaben des funktionellen MRT-Paradigmas in Beziehung gesetzt. Hierbei wird deutlich, dass die Leistung der mentalen Rotationsaufgabe stark mit der Mathematiknote korreliert ($p < 0.01$). Wobei die Fehlerrate der Zahleneinordnungsaufgabe selbst weniger stark korreliert, der Zusammenhang aber weiterhin signifikant bleibt ($p < 0.05$). Die folgenden Abbildungen stellen die Zusammenhänge dar.

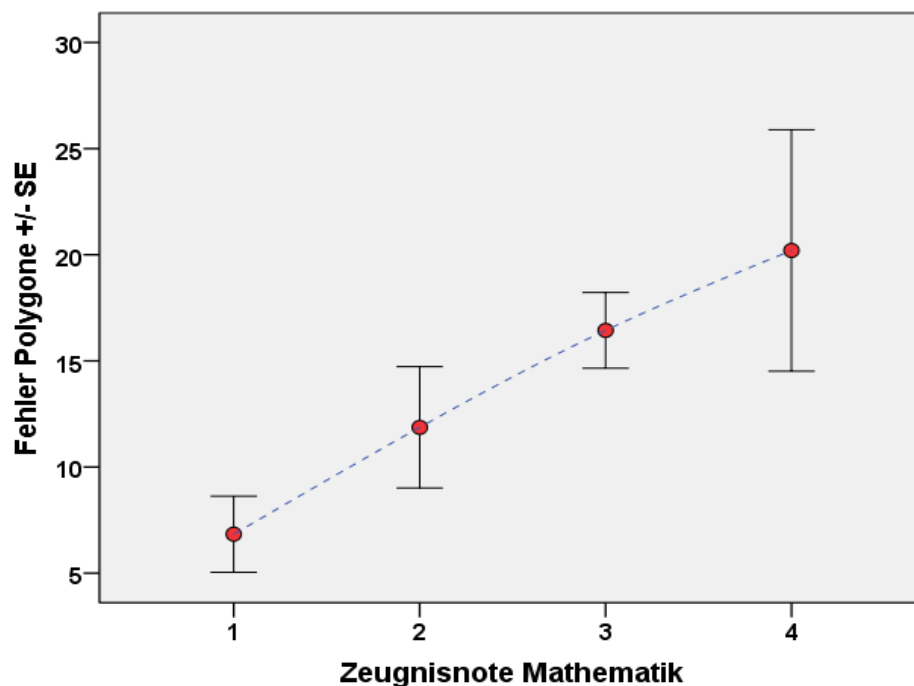


Abb. 17 : Korrelation zwischen der Fehlerrate bei der Mentalen Rotation und der Mathematiknote; $p = 0.001$; $p = 0.484$

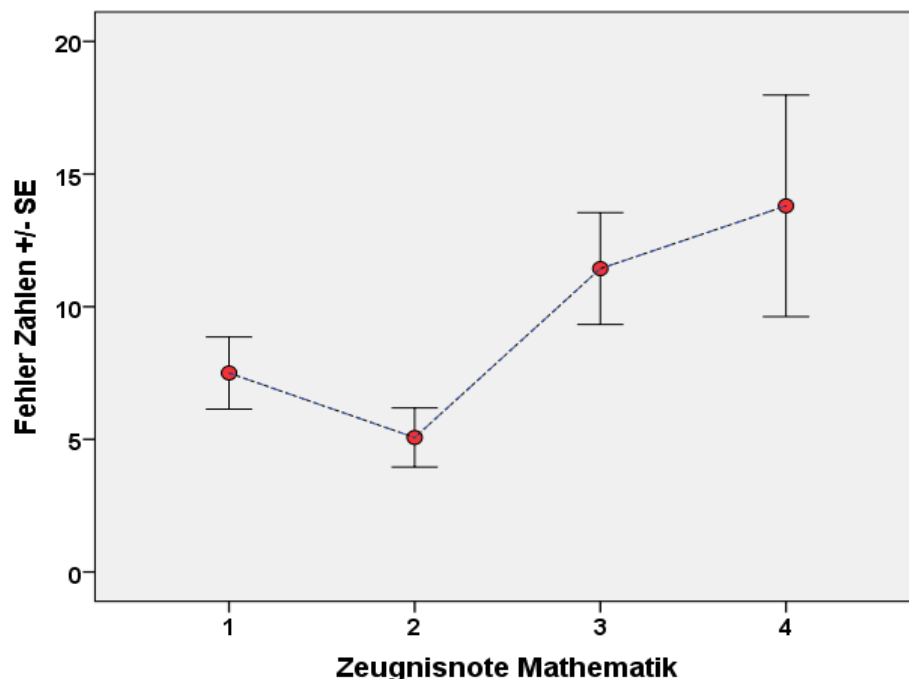


Abb. 18 : Korrelation zwischen der Fehlerrate der Zahleneinordnungsaufgabe und der Mathematiknote; $p = 0.018$; $\rho = 0.365$

Varianzanalyse der behavioralen Daten

Im Folgenden werden über eine Varianzanalyse die zuvor gemachten Korrelationsanalysen genauer beleuchtet. Es wird nur über das einzige als signifikant errechnete Modell für die univariate Varianzanalyse berichtet. Hierbei dient die Fehlerrate der mentalen Rotation als abhängige Variable zur Untersuchung der räumlichen Kompetenz. Die hierbei eingeschlossenen unabhängigen Variablen sind wie folgt: Fehlerrate zweistellige Zahlen (ErrZ099), Probleme räumliches Denken (RDenken), Abweichungen auf dem Zahlenstrahl (Zahlenstrahl) und die Mathematiknote (NoteMathe). Es konnte gezeigt werden, dass die Leistung in Mathematik am stärksten die Varianz der Fehlerrate bei der mentalen Rotation mit Polygonen erklärt (siehe Anhang Tab. 1). Im Folgenden wurde mit den hierbei eingeschlossenen Einflussvariablen (siehe Anhang Tab. 2 und 3) eine gestaffelte Regressionsanalyse durchgeführt. Nach Durchführung der gestaffelten Regressionsanalyse wird Modell 2 (siehe Anhang Tab. 4) am stärksten signifikant ($p = 0,006$). Unter Miteinzug der Freiheitsgrade erklären somit die Mathematiknote und die Fehlerrate der zweistelligen Zahlen am stärksten die Varianz bezüglich der mentalen Rotation. Hieraus ist abzulesen, dass auch die Fehlerrate der zweistelligen Zahlen eine starke Abhängigkeit mit der Performanz beim räumlichen Denken aufweist.

Geschlechtseffekte

Für die behavioralen Parameter wurde eine Korrelationsanalyse zur Identifizierung von möglichen Geschlechtseffekten durchgeführt. Hierzu wurde der Mann-Whitney Test für zwei unabhängige Stichproben entsprechend des Geschlechtes durchgeführt. Es konnte allein für den „Probleme mit Mathematik“-Score eine signifikante Korrelation berechnet werden (siehe Anhang Tab. 7). Alle anderen Parameter korrelierten nicht mit dem Geschlecht (siehe Anhang Tab. 5 und 6). Desweiteren wurde zur Darstellung von Gruppenunterschieden zwischen den Geschlechtern eine Diskriminanzanalyse durchgeführt. Es wurden hierfür alle behavioralen Daten mit eingeschlossen (siehe Anhang Tab. 8). Es konnten keine Gruppenunterschiede festgestellt werden (siehe Anhang Tab. 9 und 10). Das Modell für Geschlechtsunterschiede wurde somit nicht signifikant.

4.2 fMRT-Ergebnisse

Die funktionellen Ergebnisse wurden auf Voxel Ebene unkorrigiert mit einer Signifikanzschwelle von $p < 0,001$ berechnet. Es wurden jedoch nur Cluster berichtet, die zusätzlich auf Clusterebene mindestens für $p(\text{uncorr}) < 0,05$ signifikant sind. Die mit SMP8 erstellten Bilder und die dargestellten Aktivierungscluster beziehen sich topographisch auf das Standardgehirn-Template von SPM 8. Die anatomische Zuordnung der funktionellen Daten erfolgte u.a. mit Hilfe der „AnatomyToolbox“ von Simon Eickhoff et al. (Eickhoff *et al.* 2005, Eickhoff *et al.* 2006, Eickhoff *et al.* 2007).

4.2.1 Mentale Rotation

Mentale Rotation $60^\circ > 0^\circ$

Um grundlegende Aktivierungsmuster für die mentale Rotation zu erfassen wurde zunächst der Kontrast zwischen der Rotation bei 60° Winkeldisparität gegenüber der Kontrollbedingung bei 0° berechnet. Hierbei wurden insgesamt drei Aktivierungscluster als signifikant errechnet. Jeweils bilateral, frontal und rechts parietal. Das mitaufgeführte Cluster links parietal war für $p(\text{uncorr})$ bei dem Kontrast $60^\circ > 0^\circ$ nicht signifikant. Allerdings ergibt sich im Folgenden (s.u.) für den Kontrast $120^\circ > 0^\circ$ ein signifikantes Aktivierungscluster auch links parietal. Das globale Maximum lag links frontal (MNI: -22 -12 64) am dorsalen Ende des sulcus frontalis superior. Laut „AnatomyToolbox“ ist es dem linken Gyrus präzentralis und hierbei dem BrodmannAreal 6 zuzuordnen. Diese Zuordnung zu diesem funktionell prämotorischen Areal passt zu den Ergebnissen aus der Literatur die mentale Rotation betreffend. Hierbei ist von einer Lage im PMd auszugehen (vgl. Liesefeld 2012, linker PMd MNI: -26 -10 54). Die Lage des Aktivierungsmaximums des Clusters rechts frontal ist dem Gyrus frontalis superior zuzuordnen. Die Koordinaten für das Maximum liegen hier bei MNI: 26 -10 58 wobei die Wahrscheinlichkeit für die Zuordnung zum BrodmannAreal 6 statistisch laut „AnatomyToolbox“ immer noch bei 30% liegt. Somit kann von einer beidseitigen Aktivierung des PMd ausgegangen werden. Nach strenger FWE-Korrektur zeigt sich das Cluster rechts parietal mit dem Aktivierungsmaximum bei MNI: 16 -66 54 signifikant. Das Maximum ist dem rechten superioren Parietallappen zuzuordnen. Das Aktivierungscluster links parietal ist insgesamt dem linken superioren Parietallappen zuzuordnen. Wobei das Aktivierungsma-

ximum potentiell dem SPL 7P, 7A als auch dem linken Gyrus occipitalis superior zuzuordnen ist.

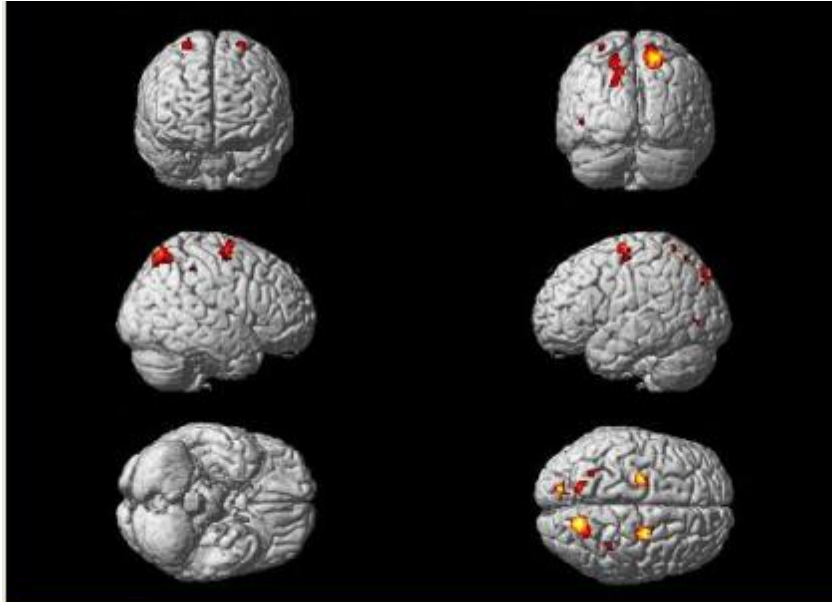


Abb. 19 : Mentale Rotation $60^\circ > 0^\circ$, Extentthreshold $k=5$ Voxel, $n=32$

Tab. 11 : Mentale Rotation $60^\circ > 0^\circ$, Extentthreshold $k=5$; $p < 0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE-corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE-corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.003	0.080	229	0.018	0.226	4.77	4.10	0.000	-22 -12 64
	0.013	405	0.003	0.474	4.36	3.82	0.000	16 -66 54
	0.117	196	0.026	0.566	4.24	3.73	0.000	26 -10 58
0.349		105	0.091	0.645	4.14	3.66	0.000	24 -8 66
				0.676	4.10	3.63	0.000	-14 -84 48
				0.831	3.88	3.47	0.000	-16 -84 36

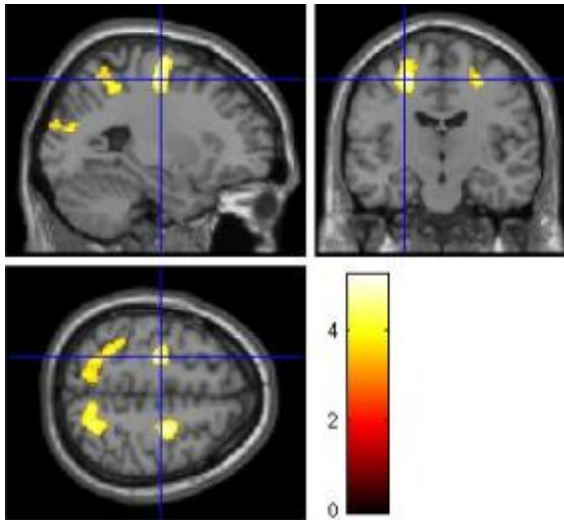


Abb. 20 : globales Maximum im linken PMd; MNI: -22 -12 64

Mentale Rotation $120^\circ > 0^\circ$

Für den Kontrast der mentalen Rotation von 120° gegenüber der 0° Kontrollbedingung wurden für $p(\text{uncorr}) < 0,05$ vier signifikante Aktivierungscluster errechnet. Diese waren im Vergleich zur Rotation bei 60° ebenfalls alle unter FWE-Korrektur signifikant. Das globale Aktivierungsmaximum befand sich ebenfalls links frontal (MNI: -26 -14 54) und ist laut „AnatomyToolbox“ ebenfalls dem linken Gyrus präzentralis und hier Brodmannareal 6 zuzuordnen. Eine geringere statistische Wahrscheinlichkeit ergab sich ebenfalls für die Lage des Clusters im Brodmannareal 4a und damit im primär motorischen Kortex links. Vergleicht man die Koordinaten des Maximums mit den Ergebnissen der Literatur, passen diese jedoch insgesamt deutlich besser zum PMd (MNI: -26 -10 54; s.o.). Das Aktivierungsmaximum rechts frontal lag bei MNI: 28 -10 54 und ist damit funktionell ebenfalls dem rechten PMd zuzuordnen. Links parietal war die wahrscheinliche Lage für Maximum 1; MNI: -28 -44 50 dem inferioren Parietallappen zuzuordnen. Wohingegen Maximum 2; MNI: -30 -52 60 im superioren Parietallappen lag. Somit ist insgesamt von einer Aktivierung des diese Koordinaten umschließenden linken IPS auszugehen. Das Aktivierungsmaximum rechts parietal MNI: 26 -60 54 ist statistisch dem superioren Parietallappen zuzuordnen, wobei die Wahrscheinlichkeiten sich auf den SPL 7A/P/C und hIP3 verteilten. Die Clustergröße und deren statistische Signifikanz ist gegenüber der Mentalen Rotation bei 60° deutlich erhöht. Ebenso ist die funktionelle Zuordnung zum PMd sowie IPS beidseits hier deutlicher.

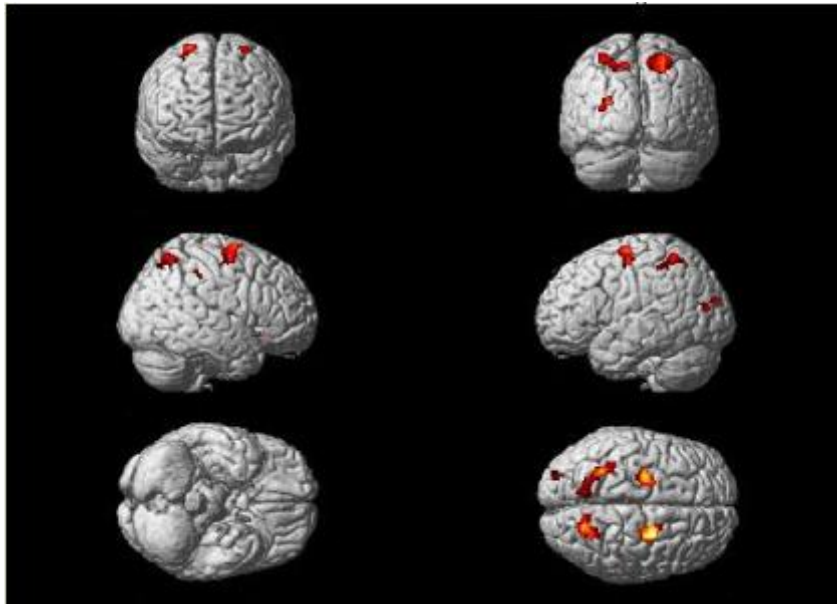


Abb. 21 : Mentale Rotation $120^\circ > 0^\circ$, Extentthreshold $k=5$ Voxel, $n=32$

Tab. 12 : Mentale Rotation $120^\circ > 0^\circ$, Extentthreshold $k=5$ Voxel, $p < 0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.009	0.011	427	0.002	0.082	5.25	4.41	0.000	-26 -14 54
				0.112	5.11	4.32	0.000	-24 -10 66
	0.008	458	0.002	0.100	5.16	4.35	0.000	28 -10 54
				0.187	4.86	4.16	0.000	24 -4 70
	0.017	380	0.004	0.317	4.59	3.98	0.000	26 -60 54
				0.505	4.32	3.79	0.000	12 -64 54
	0.015	391	0.003	0.412	4.44	3.88	0.000	-28 -44 50
				0.623	4.16	3.68	0.000	-30 -52 60
				0.733	4.02	3.68	0.000	-22 -60 54

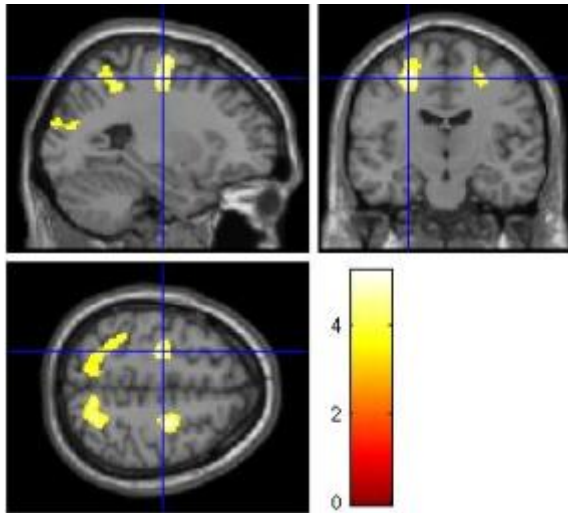


Abb. 22 : globales Maximum im linken PMd; MNI: -26 -14 54

Geschlechtseffekte

Für die Evaluierung möglicher Geschlechtunterschiede der funktionellen Daten wurden die folgenden Kontraste erstellt. Es wurde jeweils die vermehrte Aktivierung der Jungen gegenüber den Mädchen (und umgekehrt) die mentale Rotation betreffend dargestellt. Die Berechnungen beziehen sich auf alle Conditions der mentalen Rotation zusammengekommen (0°, 60°, 120°). Die Daten sind nach dem Alter und der Fehlerrate kontrolliert.

Für die neuronale Aktivierung der Jungen gegenüber den Mädchen konnten drei signifikante Cluster errechnet werden (siehe Abb. 23 und Tab. 3). Das größte Cluster mit $k=1743$ konnte durch die Anatomy toolbox nicht zugeordnet werden. Das Maximum bei MNI: 52 -36 -2 liegt am ehesten im rechten mittleren Gyrus temporalis. Das kleinste Cluster mit $k=223$ liegt mit 50%iger Wahrscheinlichkeit im inferioren Parietallappen links.

Für die Gruppe der Mädchen konnte keinerlei Mehraktivierung gegenüber den Jungen errechnet werden (siehe Abb. 24).

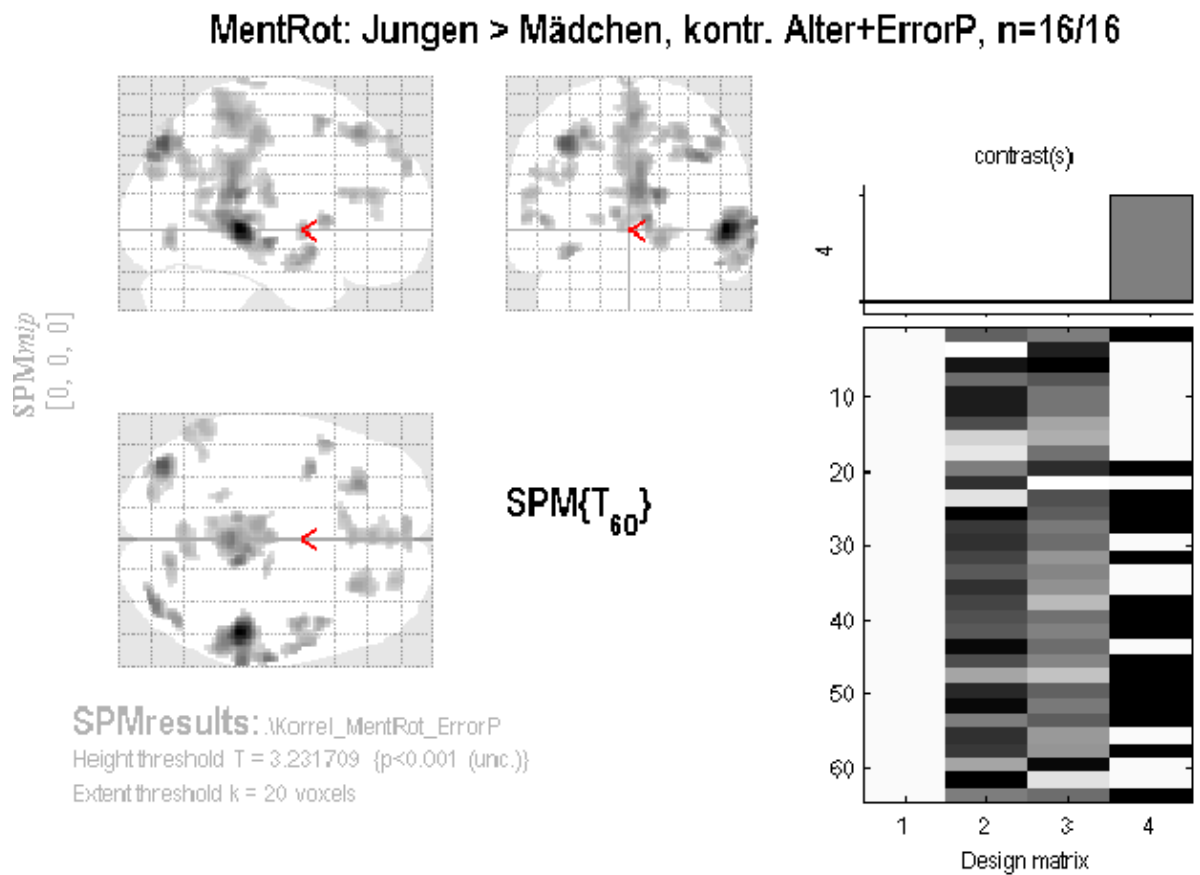


Abb. 23 : Mentale Rotation Jungen > Mädchen, kontrolliert nach Alter und Fehlerrate, Extentthreshold $k = 20$ Voxel, $n = 32$

Tab. 13 : Mentale Rotation Jungen > Mädchen, Extentthreshold $k = 20$ Voxel, $p < 0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.000	0.001	783	0.000	0.000	6.41	5.57	0.000	52 -36 -2
	0.107	223	0.028	0.023	5.14	4.66	0.000	-36 -78 44
	0.000	1743	0.000	0.065	4.80	4.40	0.000	14 -36 16

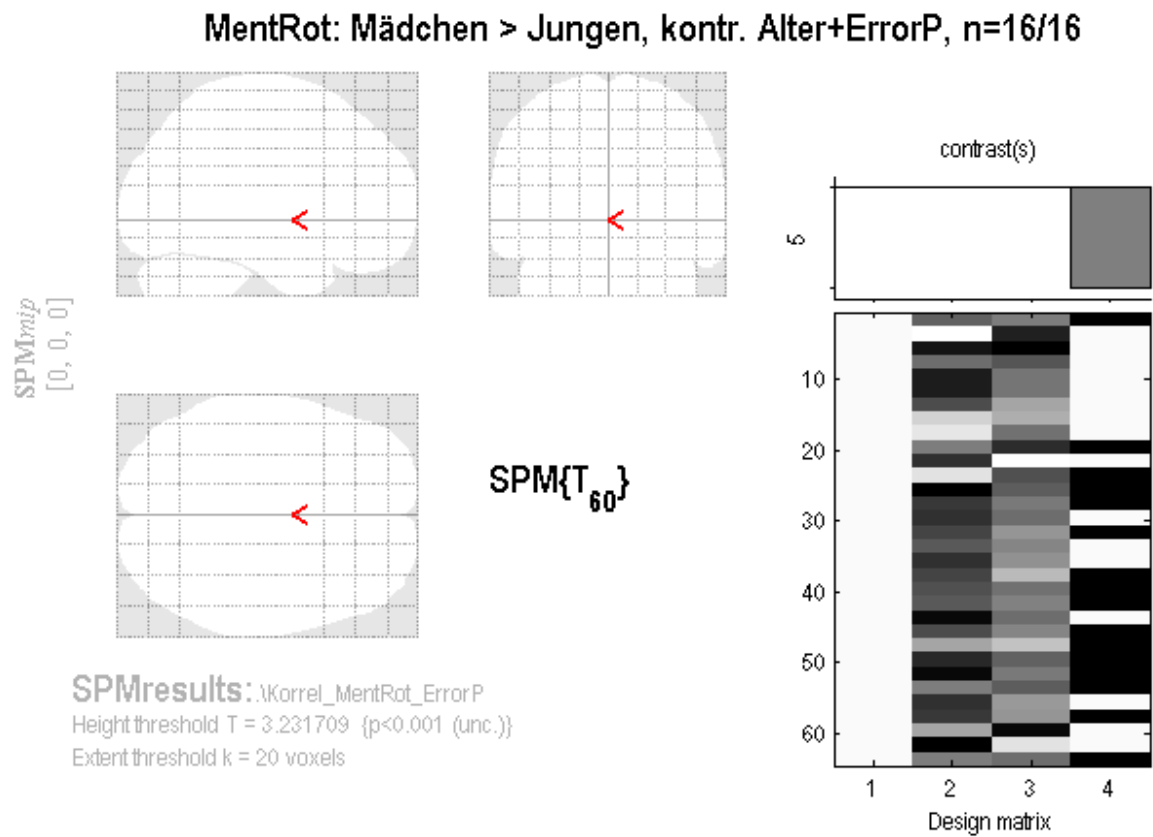


Abb.24 : Mentale Rotation Mädchen > Jungen, kontrolliert nach Alter und Fehlerrate
Extentthreshold $k = 20$ Voxel, $n = 32$

4.2.2 Zahlenverarbeitung

Für die Zahlenverarbeitung war insgesamt eine Aktivierung zusätzlicher Areale gegenüber der mentalen Rotation zu erwarten. Insbesondere Areale der linguistischen Verarbeitung und höhere Integrationszentren für die Verarbeitung komplexer Informationen.

2stellig > 1stellig

Für den Kontrast zweistelliger gegenüber einstelliger Zahlen wurden insgesamt sieben signifikante Aktivierungscluster errechnet. Das globale Maximum lag rechts frontal bei MNI: 40 - 12 66 und ist mit Hilfe der Anatomytoolbox dem Gyrus präzentralis Brodmannareal 6 zuzuordnen und somit funktionell prämotorisch einzuordnen. Die topographische Lage ist hier unterhalb des sulcus frontalis superior. Dies bedeutet, dass es sich hierbei um einen eher lateral gelegenen Teil des dorsalen prämotorischen Kortex (PMd) handelt. Cluster 2 mit dem ersten Aktivierungsmaximum bei MNI: 10 -14 8 ist im rechten Thalamus zu verorten. Ein weiteres Maximum ergab sich bei MNI: 36 -82 -8 im rechten inferioren Gyrus occipitalis. Rechtsseitig ergab sich ein weiteres Cluster in Brodmannareal 6 wobei die Lage des Maximums MNI: 6 26 44 sehr nahe an der rechten Mantelkante liegt und dem SMA zuzuordnen ist. Das Aktivierungscluster rechts parietal umschließt den Intraparietalsulcus. Und das Maximum bei MNI: 42 -52 50 wurde laut Anatomtoolbox dem inferioren Parietallappen zugeordnet. Links ergab sich ein großes Aktivierungscluster mit Maximum im mittleren Gyrus occipitalis. Die Ausdehnung des Aktivierungsareals bis in den hinteren Teil des Temporallappens kann hier Ausdruck des ventralen Verarbeitungsweges für visuelle Information sein (s.u. auch die folgenden Ergebnisse). Weitere Maxima waren hier im superioren und inferioren Parietallappen den IPS umschließend, zu verzeichnen. Ein weiteres Cluster lag medial occipital mit Maximum im linken Gyrus lingualis (Area 18 und 17). Somit sind insgesamt beidseits der IPS/SPL/IPC und rechts der PMd sowie SMA aktiv. Zusätzliche Aktivierungsareale finden sich occipital und im Gyrus lingualis links.

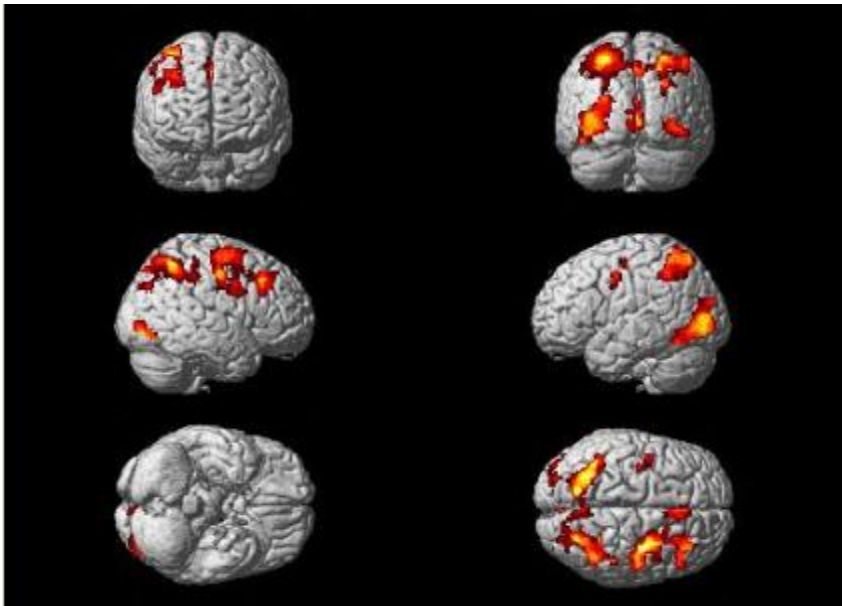


Abb. 25 : 2stellig>1stellig, Extentthreshold = 40 Voxel, n= 32

Tab. 14 : 2stellig>1stellig, Extentthreshold = 40 Voxel, p<0,001 uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.000	0.000	2710	0.000	0.006	6.34	5.04	0.000	40 -12 66
	0.000	809	0.000	0.012	6.06	4.88	0.000	10 -14 8
	0.034	313	0.008	0.016	5.95	4.82	0.000	36 -82 -8
	0.004	536	0.001	0.017	5.92	4.81	0.000	6 26 44
	0.000	3737	0.000	0.031	5.67	4.66	0.000	-38 -82 -2
	0.000	1832	0.000	0.067	5.33	4.46	0.000	-2 -66 0
	0.000	1660	0.000	0.102	5.14	4.34	0.000	42 -52 50

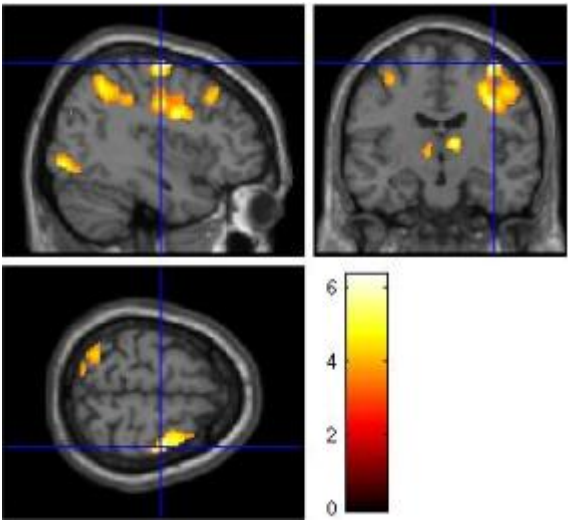


Abb. 26 : globales Maximum rechter PMd; MNI: 40 -12 66 globales Maximum

3stellig>1stellig

Das größte Aktivierungscluster lag hier ebenfalls wieder linkshemispherisch. Dessen Maximum liegt im mittleren linken Gyrus occipitalis und wird hier mit Hilfe der Anatomytoolbox dem hOC3v (BA18), also dem ventralen visuellen Kortex zugeordnet (MNI: -34 -92 0). Auch rechts wurde ein signifikantes Aktivierungscluster mit Maximum im mittleren Occipitalkortex errechnet MNI: 34 -84 0. Das Aktivierungsmaximum rechts frontal MNI: 36 -6 68 liegt in Brodmannareal 6 und laut Anatomytoolbox im Gyrus frontalis superior; zumindest aber auf jeden Fall oberhalb des sulcus frontalis inferior und somit im PMd. Rechts parietal lag das Aktivierungsmaximum (MNI: 32 -56 48) des Clusters im superioren Parietalkortex, wobei das Cluster selbst sich über den IPS bis in den apikalen Anteil des IPC erstreckt. Ein Aktivierungsmaximum im rechten Thalamus konnte bei diesem Kontrast ebenfalls erfasst werden (MNI: 12 -18 8). Ein weiteres Maximum war im rechten superioren Occipitalkortex zu verorten (MNI: 26 -76 20) und somit am dorsalen Übergang zum Temporallappen. Die auf FWE Ebene signifikanten Maxima sind hier links occipital sowie rechts frontal und parietal.

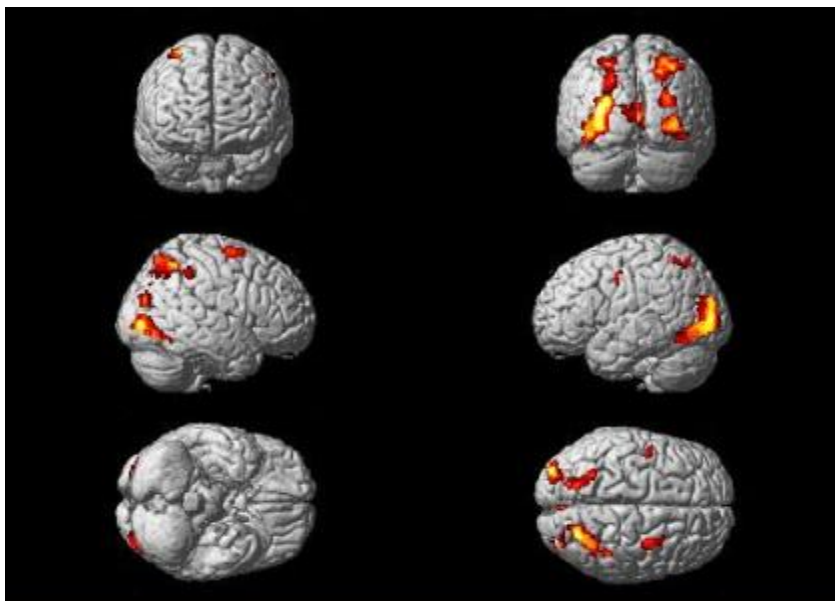


Abb. 27 : 3stellig>1stellig, Extentthreshold = 40 Voxel, n=32

Tab. 15 : 3stellig>1stellig, Extentthreshold = 40 Voxel, $p < 0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.000	0.000	3470	0.000	0.014	6.05	4.88	0.000	-34 -92 0
	0.169	157	0.037	0.038	5.62	4.63	0.000	36 -6 68
	0.000	842	0.000	0.046	5.53	4.58	0.000	32 -56 48
	0.001	681	0.000	0.118	5.12	4.32	0.000	34 -84 0
	0.056	247	0.011	0.136	5.05	4.28	0.000	12 -18 8
	0.029	305	0.006	0.174	4.93	4.21	0.000	26 -76 20

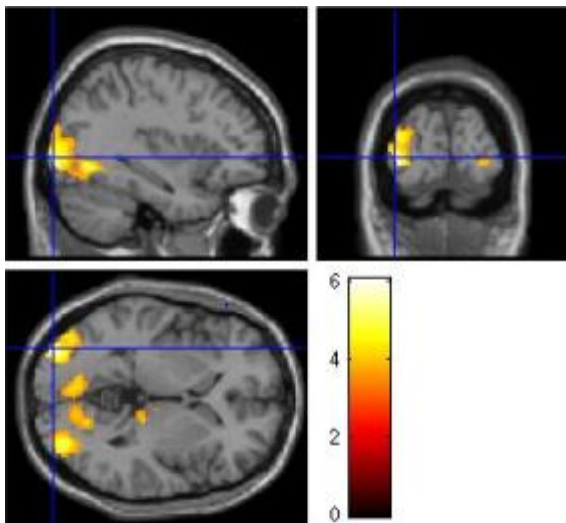


Abb. 28 : Globales Maximum linker Gyrus occipitalis; MNI: -34 -92 0

2stellig>1stellig+3stellig

Um die visuelle Anforderung der Aktivierungen auszubalancieren wurde ein weiterer Kontrast berechnet. Hier soll die Mehraktivierung, die spezifisch für zweistellige Zahlen ist, gegenüber ein- und dreistelligen zusammengefasst dargestellt werden. Hier wurden insgesamt vier signifikante Aktivierungscluster gefunden. Das globale Maximum liegt hier links im mittleren Gyrus occipitalis. Das Cluster selbst verteilt sich laut Wahrscheinlichkeitsrechnung durch die Anatomtoolbox auf den hOC4v und hOC5, also insgesamt auf den assoziativen visuellen Kortex. Ein weiteres Maximum ergab sich nahe an der Mantelkante links occipital bei MNI: -2 -66 2 und ist dem Gyrus lingualis zuzuordnen sowie funktionell der primären Sehrinde (BA 17). Wobei eine weitere Wahrscheinlichkeit für die Lage des Clusters ebenfalls in BA18 ist. Links parietal lag das Maximum im superioren Parietallappen (MNI: -28 -60 52), wobei das Aktivierungscluster selbst den SPL, IPS und IPC einschließt. Rechtsseitig

ergab sich ein sigifikantes Aktivierungscluster im dorsalen Anteil des Gyrus frontalis superior. Das Maximum bei MNI: 26 -2 54 ist dem PMd rechts zuzordnen.

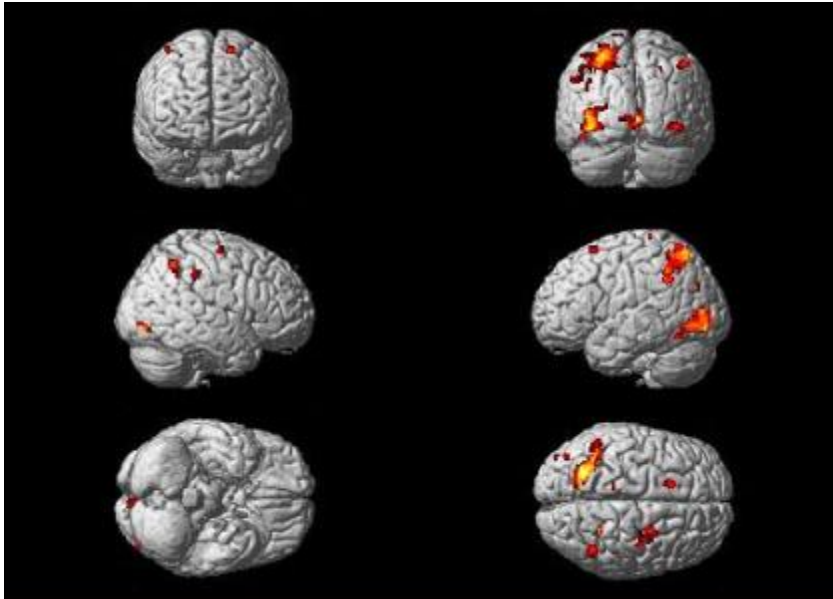


Abb. 29 : 2stellig>1stellig+3stellig, Extentthreshold k= 20 Voxel; n=32

Tab. 16 : 2stellig>1stellig+3stellig, Extentthreshold k= 20 Voxel, $p < 0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.000	0.005	523	0.001	0.170	4.88	4.17	0.000	-38 -86 -2
	0.001	761	0.000	0.217	4.77	4.10	0.000	-2 -66 2
	0.000	886	0.000	0.276	4.64	4.01	0.000	-28 -60 52
	0.074	247	0.017	0.616	4.15	3.67	0.000	26 -2 54

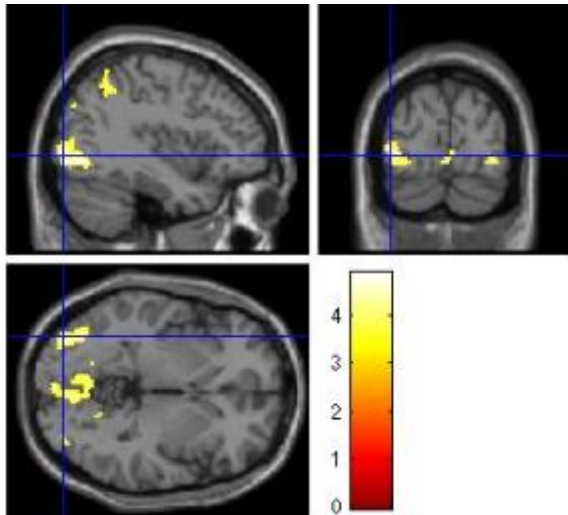


Abb. 30 : Globales Maximum linker Gyrus occipitalis; MNI: -38 -86 -2

Paired 2stellig>3stellig

Dieser Kontrast wurde für die Darstellung der Mehraktivierung während der Verarbeitung von zweistelligen gegenüber dreistelligen Zahlen angefertigt. Der Kontrast paired 3stellig>2stellig ($2st-1st > 3st-1st$) führte auf Clusterebene zu keinem signifikanten Ergebnis. Grundsätzlich war hier auf Grundlage der Ergebnisse aus der Literatur, insbesondere von einer Aktivierung des linken Gyrus angularis auszugehen. Deshalb wurde eine ROI-Analyse mithilfe des WFU Pickatlas Tool für den Gyrus angularis beidseits gerechnet. Hierbei kam es zu einer signifikanten Aktivierung nur linksseitig, wobei das Aktivierungsmaximum des Clusters auf Peak-level Ebene auch unter FWE Korrektur signifikant war MNI: - 48 -52 36.

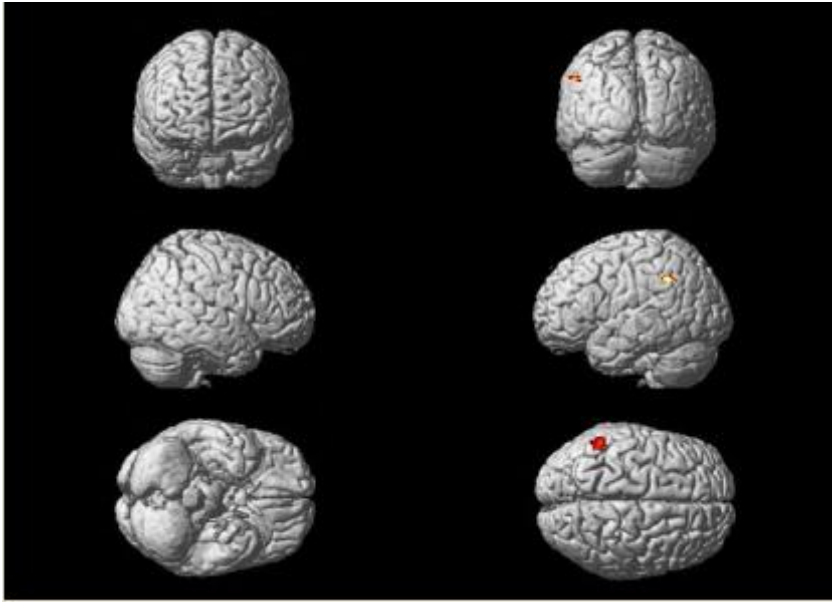


Abb. 31: Paired 2stellig>3stellig, ROI Analyse Gyrus angularis links, n=32

Tab. 17 : Paired 2stellig>3stellig, ROI Analyse Gyrus angularis links

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
-	0.067	72	0.151	0.041	4.47	3.89	0.000	-48 -52 36

Das globale Maximum für diesen Kontrast ohne ROI-Analyse lag links frontal bei MNI: -12 18 64. Dieses liegt im SMA (BA6) jedoch relativ weit lateral (pre SMA). Ein weiteres Cluster, welches das Maximum bei MNI: 2 -38 14 rechtsseitig hat, befindet sich occipital am Interhemisphärenspalt auf Höhe des Precuneus. Ebenfalls mit abgebildet ist das Cluster am linken Gyrus angularis (siehe Abb.32 und Tab.18).

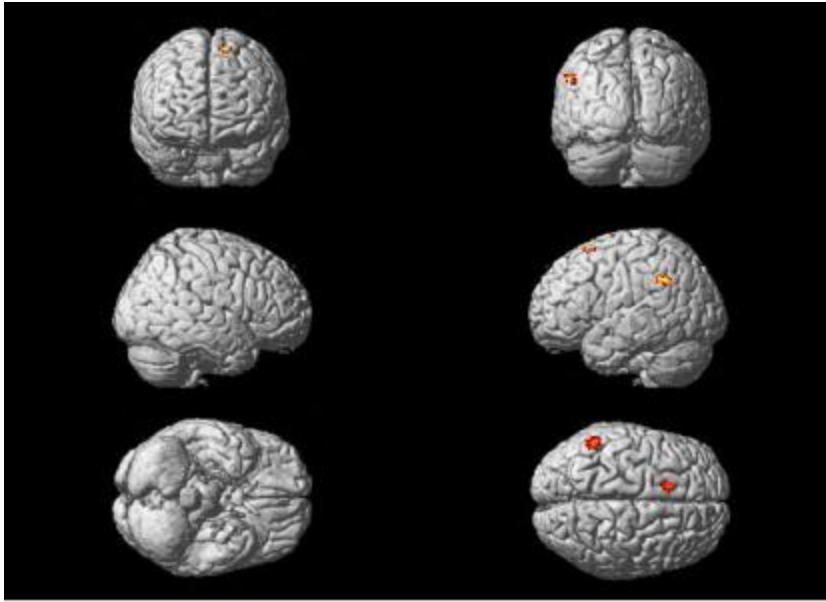


Abb. 32 : Paired 2stellig>3stellig, Extentthreshold k= 20 Voxel, n=32

Tab. 18 : Paired 2stellig>3stellig, Extentthreshold k= 20 Voxel, p<0,001 uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.363	0.636	54	0.210	0.098	5.17	4.36	0.000	-12 18 64
	0.320	111	0.080	0.404	4.47	3.89	0.000	-48 -52 36
	0.608	58	0.195	0.593	4.21	3.72	0.000	2 -38 14

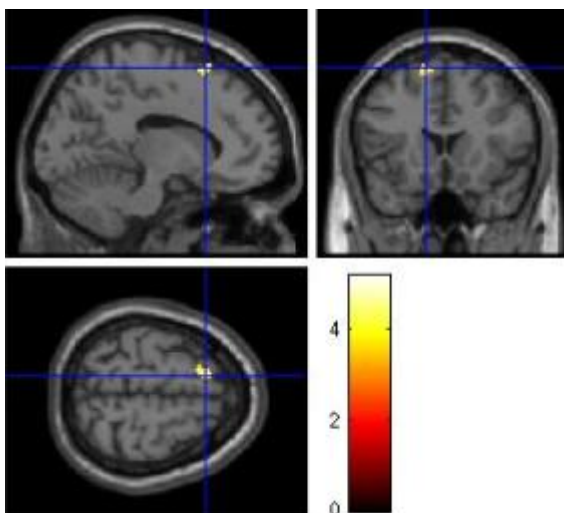


Abb. 33 : Globales Maximum linker PMd; MNI: -12 18 64

Geschlechtseffekte

Für die Darstellung möglicher Geschlechtunterschiede bei der Zahlenverarbeitung wurden die folgenden Kontraste errechnet. Diese beziehen sich auf die Mehraktivierung für große Zahlen (zwei- und dreistellige) gegenüber kleinen Zahlen (einstellig) jeweils für Jungen bzw. Mädchen. Die Aktivierungen wurden für das Alter und die Fehlerrate kontrolliert. Insgesamt ergab sich für kein Geschlecht eine eindeutige Mehraktivierung. Die errechneten Cluster sind nicht signifikant. Für die Jungen zeigten sich die Cluster laut Anatomy-toolbox jeweils in der Insula beidseits (k=95 links; k=92 rechts) und im Operculum (k= 58; Area 44 rechts). Das Cluster mit Maximum MNI: 36 18 -6 konnte nicht zugeordnet werden.

Bei der Gruppe der Mädchen konnte Cluster 2 (k=51) nicht zugeordnet werden. Das Cluster mit Maximum MNI: 20 -10 52 (k= 56) liegt mit 20%iger Wahrscheinlichkeit in Area6 rechts. Das letzte Cluster mit k= 27 liegt am wahrscheinlichsten in Area 3a rechts.

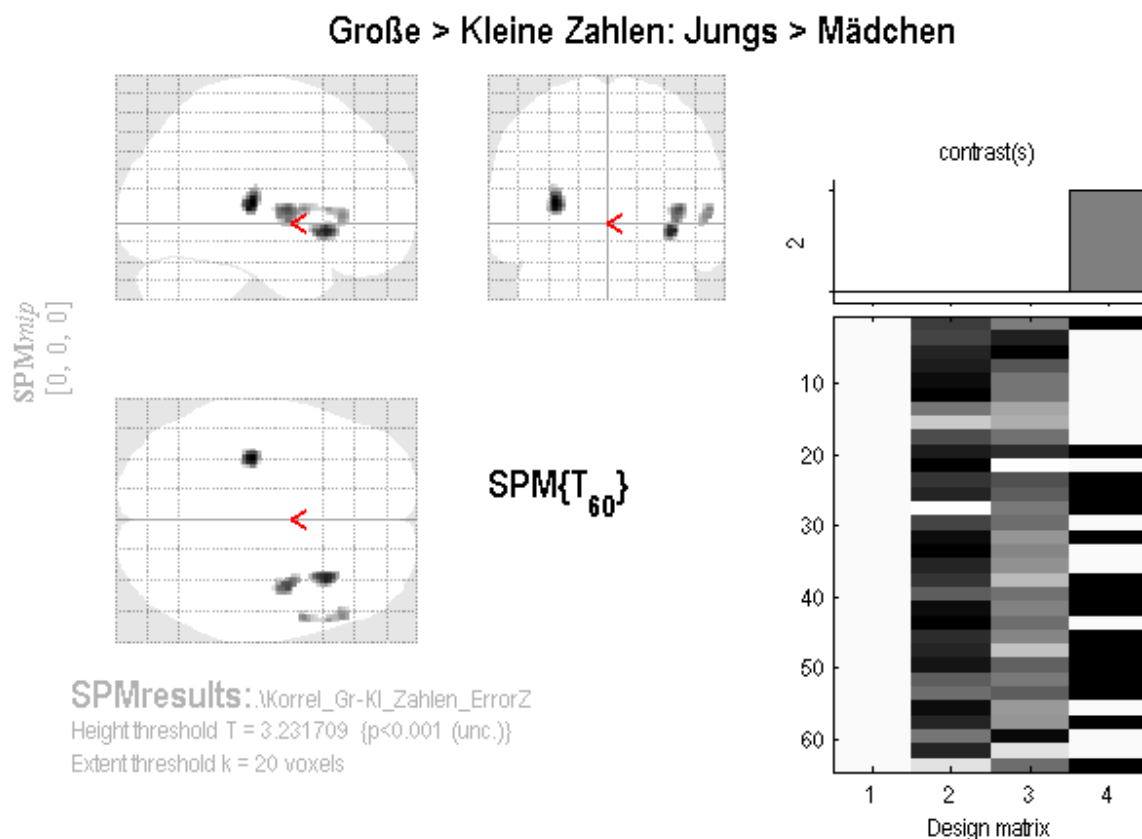


Abb. 34: Große (zwei- und dreistellige) > kleine (einstellige) Zahlen: Jungen > Mädchen, kontrolliert nach Alter und Fehlerrate, Extentthreshold $k = 20$ Voxel, $n = 32$

Tab. 19: Große (zwei-und dreistellige) > kleine (einstellige) Zahlen: Jungen > Mädchen, Extentthreshold $k=20$ Voxel, $p<0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.150	0.412	95	0.125	0.168	4.47	4.14	0.000	-32 -24 10
	0.486	80	0.156	0.287	4.26	3.96	0.000	36 18 -6
	0.426	92	0.130	0.460	4.04	3.78	0.000	40 -4 6
	0.614	58	0.223	0.730	3.74	3.53	0.000	56 6 6

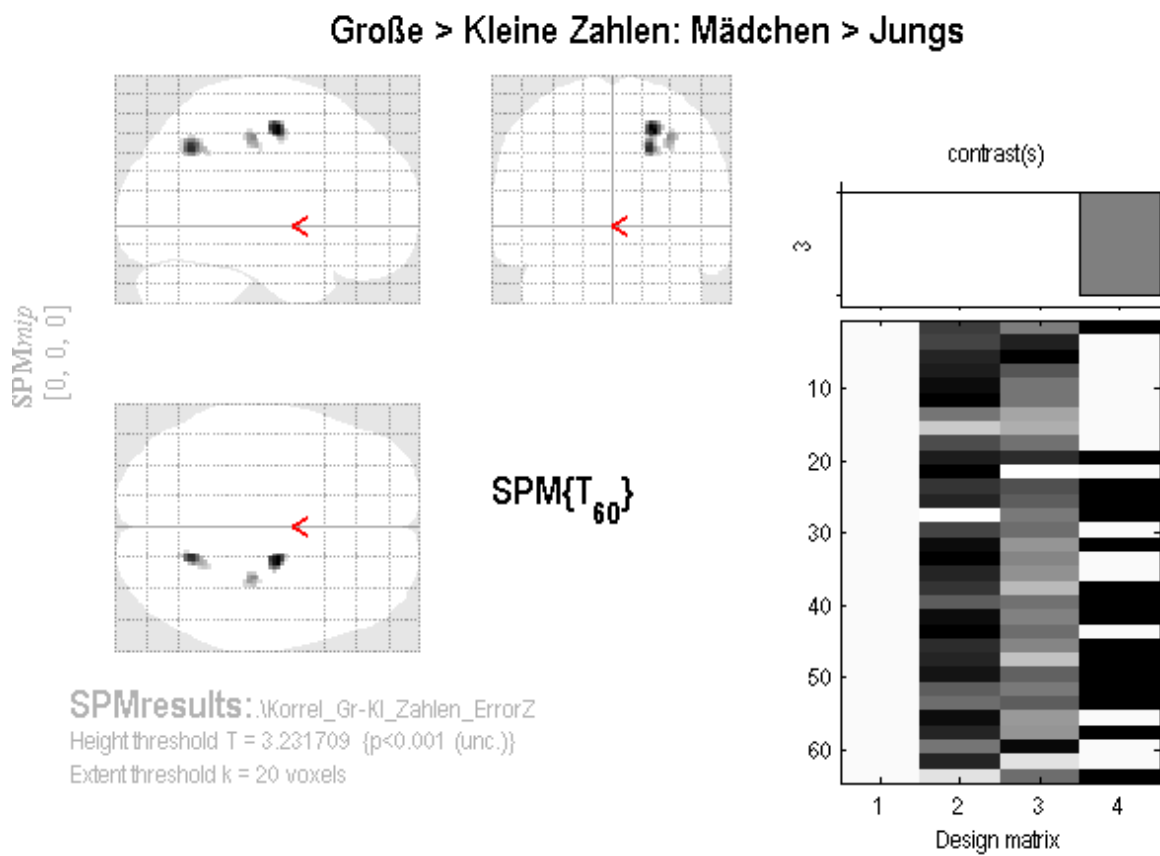


Abb. 35: Große (zwei-und dreistellige) > kleine (einstellige) Zahlen: Mädchen > Jungen, kontrolliert nach Alter und Fehlerrate, Extentthreshold $k=20$ Voxel, $n = 32$

Tab.20: Große (zwei- und dreistellige) > kleine (einstellige) Zahlen: Mädchen > Jungen, Extentthreshold $k=20$ Voxel, $p<0,001$ uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.334	0.627	56	0.231	0.179	4.45	4.12	0.000	20 -10 52
	0.659	51	0.253	0.348	4.17	3.89	0.000	18 -60 40
	0.823	27	0.406	0.771	3.70	3.49	0.000	30 -24 46

4.2.3 Gemeinsame Betrachtung von Zahlenverarbeitung und Mentaler Rotation

2stellige-1stellige Zahlen > Mentale Rotation 60° - 0°

Die Errechnung dieses Kontrastes erfolgte zur Darstellung der Aktivierung der Informationsextraktion während der Zahlenverarbeitung gegenüber der mentalen Rotation bezogen auf einen jeweiligen Komplexitätsgewinn. Insgesamt ergaben sich sechs signifikante Aktivierungscluster. Das globale Maximum (MNI: 58 -54 34) lag rechts im inferioren Parietallappen und wurde dem rechten Gyrus angularis zugeordnet. Das Cluster selbst umfasst den Intraparietalsulcus (IPS/hIP1/2/3) sowie inferiore Anteile des superioren Parietallappens (SPL/7A). Das größte Aktivierungscluster lag rechts im mittleren Gyrus frontalis mit einem Maximum bei MNI: 30 16 38. Das Cluster selbst liegt im inferioren Anteil des PMd beziehungsweise am Übergang zum ventralen prämotorischen Kortex (PMv/BA 45). Das Cluster erstreckt sich vom superioren bis zum inferioren Gyrus frontalis. Ebenfalls lag ein Maximum im rechten Thalamus (MNI: 2 6 4). Ein weiteres Aktivierungsmaximum lag rechts frontal bei MNI: 20 36 6. Das Cluster links parietal umfasst den IPS sowie Anteile des SPL und IPC. Das Maximum lag hier im inferioren Parietalkortex und wurde dem Gyrus angularis zugeordnet MNI: -42 -62 40. Links frontal war wiederum ein Cluster signifikant, dessen Maximum (MNI: -36 14 50) dem PMd (BA6) zuzuordnen ist, und dessen Lage im mittleren Gyrus frontalis ist. Also handelt es sich hier wieder um eher inferiore Anteile des PMd. Entscheidend hierbei ist, dass für den Kontrast „Mentale Rotation 60° - 0° > 2stellige -1stellige Zahlen“ kein Aktivierungsmuster errechnet werden konnte.

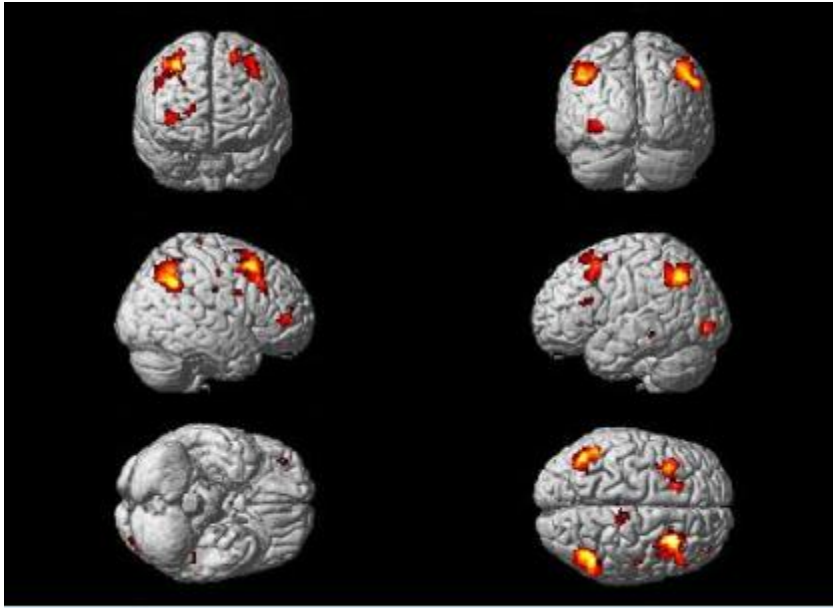


Abb. 36 : 2stellige -1stellige Zahlen > Mentale Rotation 60°- 0°; Extentthreshold k= 20
Voxel, n=32

Tab. 21 : 2stellige -1stellige Zahlen > Mentale Rotation 60°- 0°; Extentthreshold k= 20,
p<0,001 uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.000	0.001	856	0.000	0.067	5.29	4.43	0.000	58 -54 34
	0.001	711	0.000	0.077	5.23	4.39	0.000	-42 -62 40
	0.000	1071	0.000	0.104	5.09	4.31	0.000	30 16 38
	0.017	410	0.004	0.164	4.88	4.17	0.000	-36 14 50
	0.103	223	0.025	0.296	4.58	3.97	0.000	2 6 4
	0.012	449	0.003	0.384	4.44	3.87	0.000	20 36 6

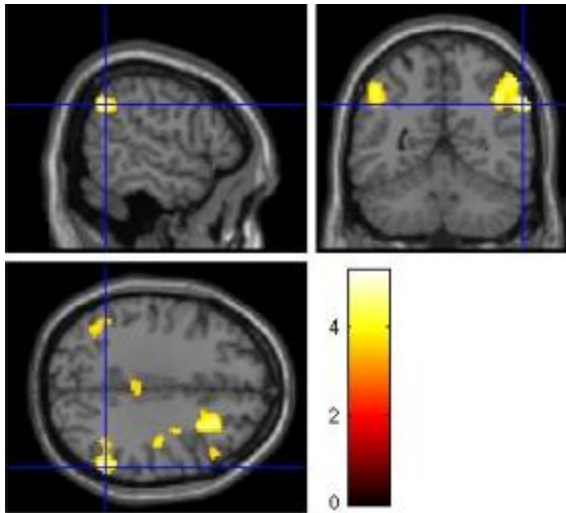


Abb. 37 : Globales Maximum rechter inferiorer Parietallappen MNI: 58 -54 34

Conjunction Analyse Mentale Rotation 60° + 2stellige-1stellige Zahlen

Welche Areale für die mentale Rotation bei 60° und die Einordnung von Zahlen im 2stelligen Bereich bezogen auf den Komplexitätsgewinn gleichermaßen aktiv sind, wurde mit Hilfe einer Conjunction Analyse dargestellt. Die drei größten Cluster waren hierbei beidseits parietal sowie rechts frontal zu verorten. Links parietal ist das Maximum (MNI: -16 -66 56) dem SPL zuzuordnen, wobei das Cluster den IPS und Teile des IPL umfasst. Das Cluster rechts parietal ist kleiner und dessen Maximum liegt ebenfalls im SPL (MNI: 24 -62 56). Das Maximum rechts frontal ist dem PMd zuzordnen (MNI: 28 -6 54).

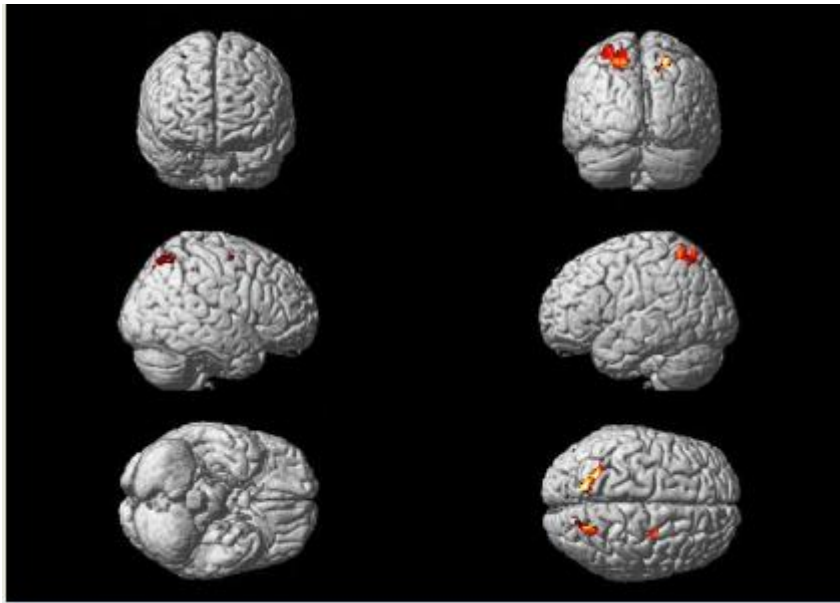


Abb. 38 : Mentale Rotation 60° + 2stellige - 1stellige Zahlen, Extentthreshold k= 20 Voxel, n=32

Tab. 22 : Mentale Rotation 60° + 2stellige - 1stellige Zahlen, Extentthreshold k= 20 Voxel, p<0,001 uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.215	0.085	252	0.022	0.448	4.02	3.77	0.000	-16 -66 56
	0.400	100	0.128	0.531	3.93	3.70	0.000	24 -62 56
	0.678	48	0.283	0.610	3.84	3.62	0.000	28 -6 54

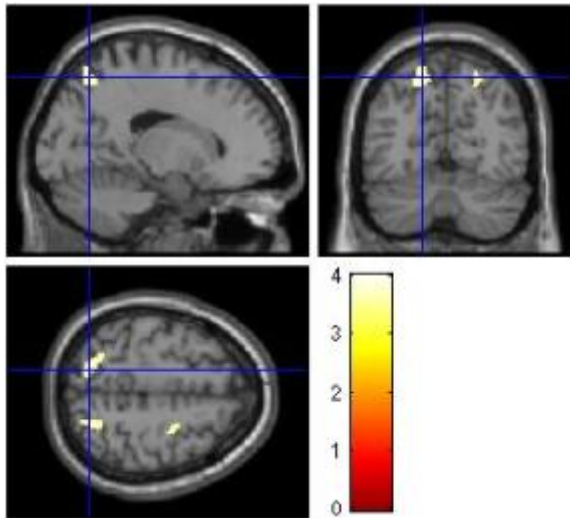


Abb. 39 : Globales Maximum linker superiorer Parietallappen; MNI: -16 -66 56

Folgende Abbildung verdeutlicht die gemeinsamen Aktivierungsareale, die durch die Conjunctionanalyse errechnet wurden (s.o.).

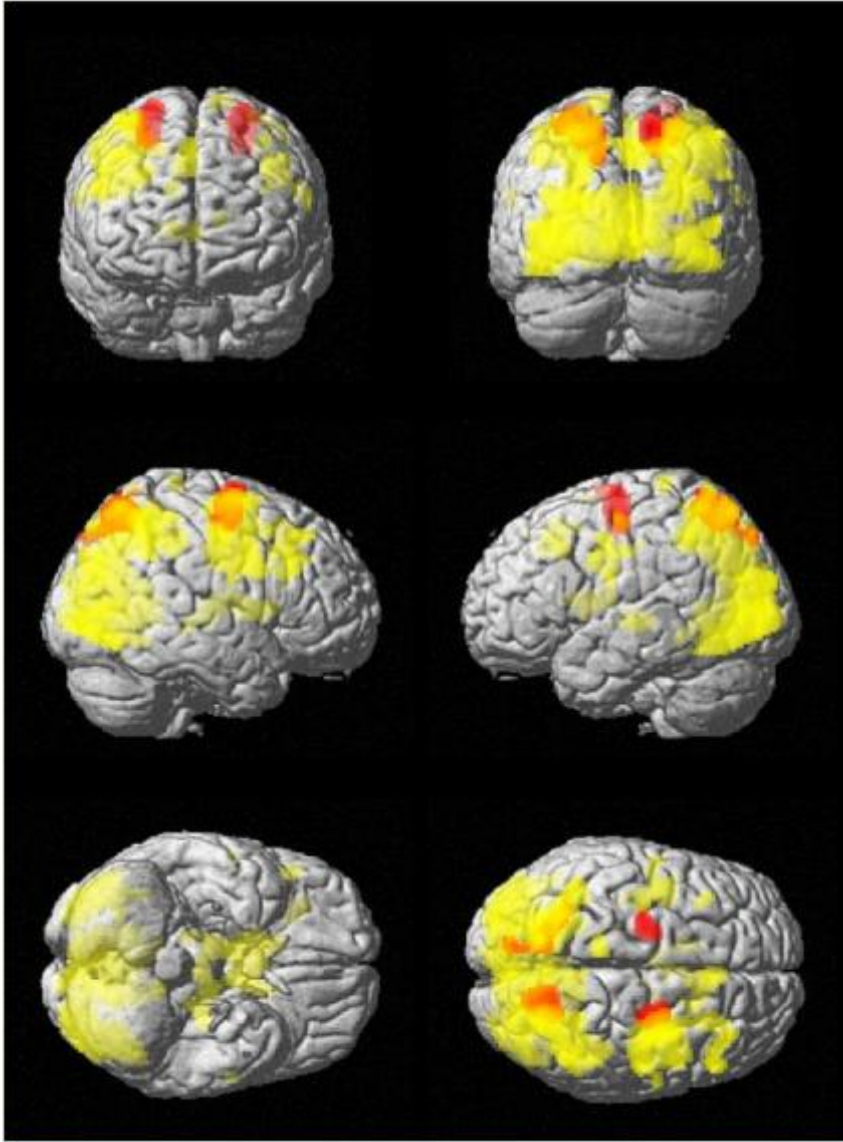


Abb. 40 : Mentale Rotation 60° / rot; 2stellige-1stellige Zahlen / gelb; Areale die gemeinsam aktiviert sind / orange; Extentthreshold $k=20$ Voxel, $n=32$

2stellige > 1stellige + 3stellige Zahlen maskiert für Mentale Rotation 60° + 120°

Vorliegender Kontrast wurde berechnet um die Überschneidung der Aktivierung für den Umgang mit zweistelligen Zahlen und der mentalen Rotation darzustellen. Hierbei ging es hauptsächlich um das neuronale Korrelat der zweistelligen Zahlen für den die visuelle Komplexität durch den Kontrast 2stellige > 1stellige + 3stellige Zahlen ausbalanciert ist. Dadurch werden die Areale betrachtet die spezifisch für zweistellige Zahlen sind und nicht dem visuellen Input oder dem Komplexitätsgewinnes aufgrund zunehmender Zahlengröße z.B. im Vergleich zu einstelligen Zahlen entsprechen. Um zu evaluieren ob es hierbei Areale gibt die der räumlichen Verarbeitung entsprechen, wurde eine ROI-Analyse mit einer hierfür angefertigten Maske der mentalen Rotation 60 + 120° durchgeführt. Die Überschneidung mit der mentalen Rotation als räumliche Aufgabe zeigt, dass hier v.a. der IPS links ein gemeinsames Areal der Verarbeitung darstellt. Es entspricht dem globalen Maximum bei MNI -26 -60 52. Weitere aktivierte Areale zeigen sich im rechten pMD sowie links temporooccipital, diese sind jedoch auf Clusterebene nicht signifikant und werden deshalb hier nicht weiter beschrieben.

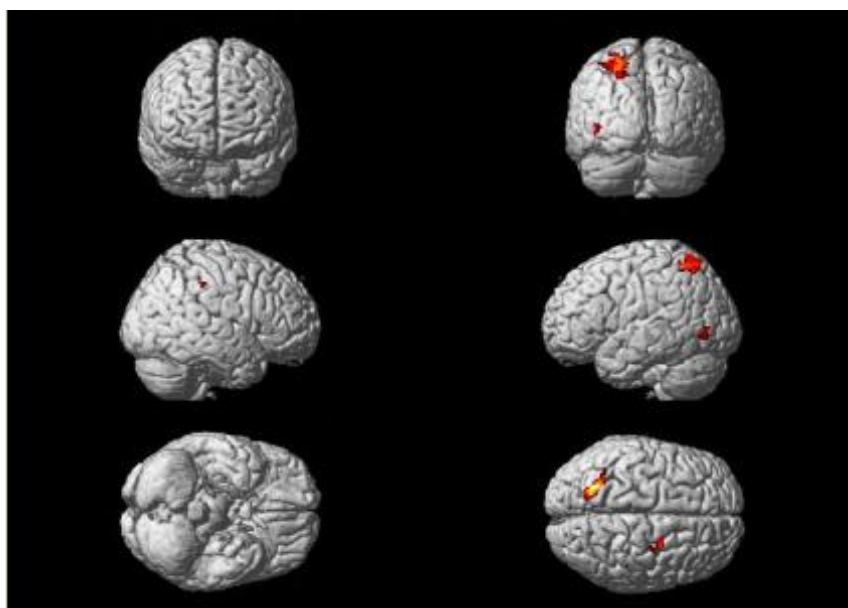


Abb. 41 : 2stellig > 1stellig + 3stellig mit Maske Mentale Rotation 60° + 120°, Extentthreshold $k=20$ Voxel, $n=32$

Tab. 23 : 2stellig > 1stellig + 3stellig mit Maske Mentale Rotation 60° + 120°, Extentthreshold k= 20 Voxel, p<0,001 uncorrected

set-level p	Cluster p (FWE- corr)	Cluster K	Cluster p(uncorr)	Peak-level P(FWE- corr)	Peak-level T	Peak-level Z	Peak-level p(uncorr)	MNI x,y,z {mm}
0.000	0.003	327	0.007	0.033	4.49	3.91	0.000	-26 -60 52

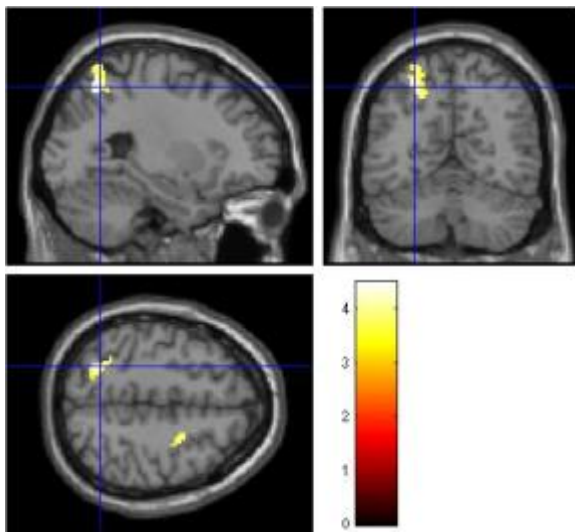


Abb.42 : Globales Maximum linker IPS; MNI: -26 -60 52

Folgende Abbildung zeigt die Überlappung der Aktivierungsareale für zweistellige Zahlen nach visueller Ausbalancierung (gelb) sowie die hierfür verwendete Maske der mentalen Rotation (rot). Die stärkste Überschneidung liegt hier deutlich im IPS links (orange).

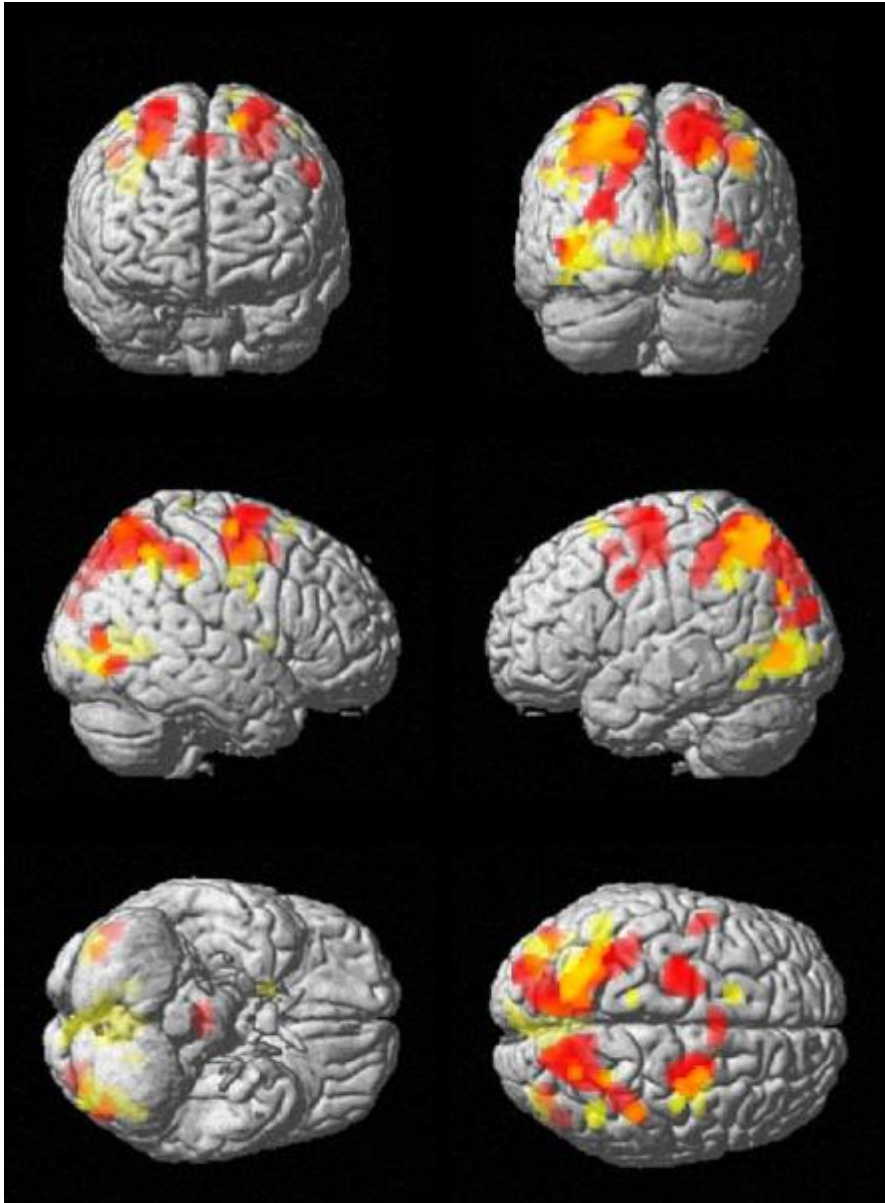


Abb. 43: Mentale Rotation $60^\circ + 120^\circ$ / rot; 2stellig>1stellig + 3stellig / gelb; gemeinsame Arelae / orange; Extentthreshold $k=20$ Voxel, $n=32$

5 Diskussion

In vorliegender Studie wurde eine mentale Rotationsaufgabe zur Überprüfung der räumlichen Verarbeitungskomponente mit einer Zahleneinordnungsaufgabe in einem Paradigma kombiniert. Die beiden Aufgabentypen lagen hier jeweils in einer nach ihrer Komplexität gestaffelten Form vor. Die numerische Aufgabe war nach dem Zehnerbereich, in dem sich die Zahlen befanden, gestaffelt. Die mentale Rotationsaufgabe entsprechend der Winkeldisparität. Die Aktivierungsmuster der mentalen Rotation konnten hier im Wesentlichen den Ergebnissen aus der Literatur entsprechend reproduziert werden. Ebenso ergab sich eine mit der Winkeldisparität einhergehende Verschlechterung der Performanz, die sich in einer erhöhten Fehlerrate und längeren Reaktionszeit bis zur Antwortgabe äußert. Die funktionellen Aktivierungen waren hingegen deutlicher ausgeprägt. Die numerische Verarbeitung betreffend ergab sich mit zunehmender Komplexität der Aufgabe ebenfalls eine Verlängerung der Reaktionszeit. Allerdings war die Fehlerrate nicht proportional zur Zahlengröße zunehmend, sondern im Bereich der zweistelligen Zahlen am größten.

Basierend auf dem Modell des dreigeteilten Verarbeitungsprozesses für numerische Information nach S. Dehaene wurde bereits vermutet, dass die semantische Komponente Teil des räumlichen Verarbeitungsnetzwerkes ist. Diese Annahme geht im Wesentlichen konform mit der Theorie, dass die zur - evolutionär gesehen - jungen Anwendung von Zahlensymbolen genutzten Hirnareale ursprünglich einem anderen Zweck dienten. Vorliegende Studie wurde mit Kindern durchgeführt, da gerade in diesem Probandenkollektiv von einer erschwerten Informationsextraktion bei der Zahlenverarbeitung im Vergleich zur mentalen Rotation auszugehen war. Zugrundeliegende Annahme ist hierbei, dass sich die Expertise im Umgang mit Zahlen entwicklungs- und bildungsbedingt verbessert.

Bislang gibt es nur eine geringe Anzahl von Studien, die die Zahlenverarbeitung im Kindesalter an einem gesunden Probandenkollektiv genauer beleuchten (Kaufmann *et al.* 2011). Es liegen diesbezüglich Studien vor, in denen gezeigt werden konnte, dass ein basales Verständnis für nicht numerische Mengeneinordnungen bereits bei Kindern im Alter von wenigen Monaten vorliegt. So konnte z.B. gezeigt werden, dass Kinder bereits ab dem 5. Lebensmonat in der Lage sind, die Größe einer Menge zu erfassen (Wynn *et al.* 2002) und ab dem 11. Lebensmonat Ordinalitäten erfassen können (Brannon 2002). Es konnte gezeigt werden, dass der

IPS bereits im frühen Kindesalter von vier Jahren in den Prozess der approximativen Mengenerfassung involviert ist (Cantlon *et al.* 2009).

In vorliegender Studie wurde überprüft ob es einen gemeinsamen Verarbeitungsweg für numerische und räumliche Aufgaben bereits im Kindesalter gibt. Insbesondere sollte die spezielle Rolle der Verarbeitung zweistelliger Zahlen betrachtet werden.

Für die numerischen und räumlichen Aufgaben konnten auf behavioraler Ebene hierbei keine signifikanten Geschlechtsunterschiede festgestellt werden. Alleine bei der gefühlten Beurteilung von „Problemen in Mathematik“ schnitten die Mädchen schlechter ab. Dies kann Ausdruck einer negativen Selbsteinschätzung sein welche sich aber in den Verhaltensdaten nicht bestätigen ließ. Auch aus den funktionellen Daten der Zahlenverarbeitung konnten keine signifikanten Geschlechtsunterschiede berechnet werden. Dies könnte neben dem tatsächlichen Fehlen eines Geschlechterunterschiedes auch durch eine zu geringe Studienteilnehmerzahl bedingt sein. Betrachtet man die Gehirnaktivierung bei der mentalen Rotation so zeigen die männlichen Probanden eine stärkere jedoch unspezifische Gehirnaktivierung. Dies kann Ausdruck einer vermehrten Beanspruchung neuronaler Netzwerke sein weil die Anforderungen an den Probanden höher sind. Dies wäre gerade die männlichen Teilnehmer betreffend jedoch nicht ohne Weiteres zu erwarten gewesen. Da sich in der Literatur häufig ein gewisser Vorteil der männlichen Probanden bezüglich räumlicher Aufgaben gezeigt hat (Tzuriel & Egozi 2010). Eine mögliche Erklärung für dieses Aktivierungsmuster kann auf morphologischer Ebene gefunden werden. In einer anderen Studie des UKS konnte durch Voxel based morphometry (VBM) - Analysen gezeigt werden dass, Jungen in vorliegendem Altersspektrum (10 bis 14 Jahre) insgesamt ein größeres Hirnvolumen als Mädchen haben (siehe Abb. 44). Das abgebildete Diagramm wurde den Daten der Promotionsarbeit von Axel Neuhaus entnommen (mündlich übermittelt). Durch die räumliche Kompression der funktionellen Daten könnte die männliche Hirnaktivierung somit erhöht erscheinen. Da weder behavioral noch funktionell signifikante Geschlechtsunterschiede vorhanden sind wurden für die Hauptanalysen beide Gruppen gemeinsam betrachtet.

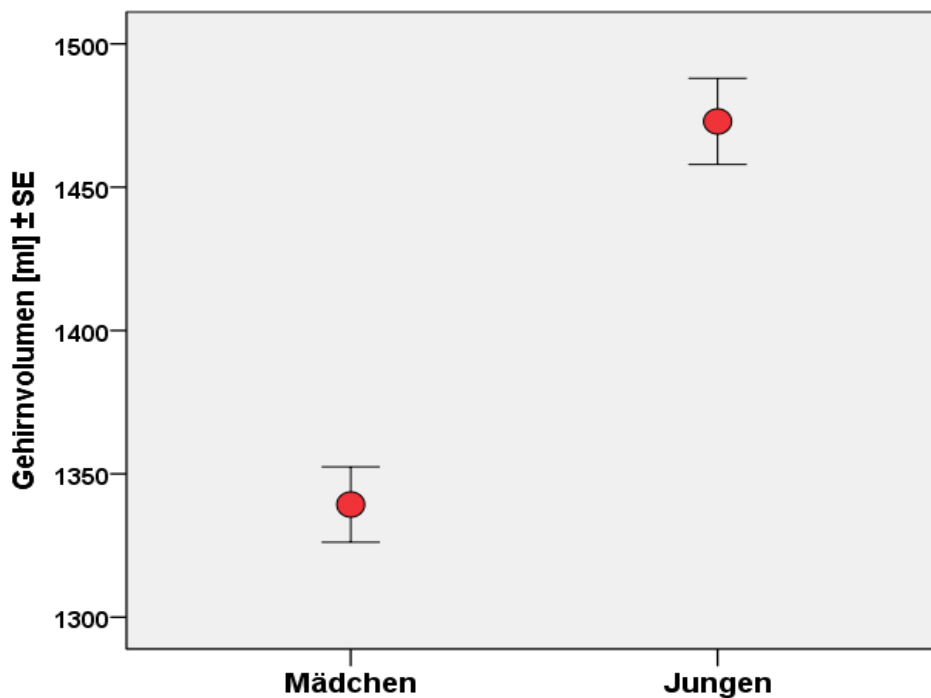


Abb. 44 : Gehirnvolumen in ml für Mädchen und Jungen, n=108; Promotionsarbeit von Axel Neuhaus/UKS

Nach Durchführung einer Conjunction-Analyse konnte gezeigt werden, dass gemeinsame Aktivierungsareale in die Verarbeitung von Zahlen und die mentale Rotation von Polygonen involviert sind. Die gemeinsamen Areale lagen beidseits parietal sowie rechts frontal im PMd. Dieses Aktivierungsmuster ist interessanterweise vergleichbar mit dem in der Literatur für Kinder *mit* gegenüber der *ohne* Entwicklungsdyskalkulie beschriebenen - beidseits im inferioren Parietallappen (rechts nahe des Gyrus supramarginalis, links nahe des IPS) sowie rechts im prämotorischen Kortex (Brodmannareal 6) (Kaufmann *et al.* 2011). Da gerade dieses Aktivierungsmuster durch die Überschneidung mit der räumlichen Verarbeitung die semantische Komponente widerspiegelt, ist anzunehmen, dass diese im Kindesalter einen wichtigen Stellenwert für die Expertise im Umgang mit Zahlen darstellt. Kinder ohne Dyskalkulie zeigten in der Literatur u.a. eine verstärkte Aktivierung präfrontaler Areale was ein Hinweis für die Beanspruchung strategischer Abläufe sein kann. Bezüglich der Nutzung unterschiedlicher Strategien ist auch die Frage nach einer im Kindesalter voneinander weitgehend getrennten Verarbeitung symbolischer und nicht symbolischer Größenverarbeitungen von Bedeutung (Kaufmann *et al.* 2011). Somit kommt es erst im Lauf der Entwicklung zu einer vermehrten Integration der verschiedenen Repräsentationswege numerischer Information. Im Rahmen dessen bildet sich womöglich erst die Kompetenz zur vermehrten Beanspruchung holistischer

Wege aus. In vorliegender Studie kann die mit der räumlichen Verarbeitung überlappende Aktivierung als Korrelat der nicht-symbolischen Repräsentation der numerischen Verarbeitung betrachtet werden. Somit spricht dies für eine sich in vorliegendem Probandenkollektiv überlappende Repräsentation der symbolischen und nicht symbolischen Zahlenverarbeitung. Ebenso bietet sich hier die Grundlage für weitergehende Forschung, die verifizieren könnte, ob sich das Entwicklungsmodell auch funktionell in einer größeren Schnittmenge zwischen numerischer und räumlicher Verarbeitung im Erwachsenenalter widerspiegelt. Vergleicht man die Koordinaten meiner Studie mit denen in Deheanes Artikel „3 parietal circuits“ (Dehaene *et al.* 2003), so kann zumindest das rechtsseitige parietale Aktivierungsmaximum dem horizontalen IPS zugeordnet werden. Das Maximum der linksseitigen parietalen Aktivierung liegt im SPL. Gerade der HIPS wird als Substrat der numerischen Größenrepräsentation postuliert. Allerdings ist dieser in vorliegender Studie auch eindeutig bei der Verarbeitung räumlicher Information aktiviert. Somit kann die These verifiziert werden, dass die numerische Größenzuordnungsaufgabe eine räumliche Verarbeitungskomponente hat. Allerdings kann hierdurch auch weiterhin die Annahme bestärkt werden, dass die parietale Aktivierung ein komplexes neuronales Gefüge widerspiegelt, welches in unterschiedliche kognitive Leistungen involviert ist und somit am ehesten sich überschneidende funktionelle Netzwerke beinhaltet (Dormal & Pesenti 2009) und keine exklusiven domänenspezifischen Subgefuge vorliegen, wie es einige Autoren zu etablieren versuchen (Shuman & Kanwisher 2004). In der Studie von Wim Fias *et al.* (Fias *et al.* 2003) konnte bereits ein gemeinsames Areal im IPS (links) für symbolische und nicht-symbolische Größenverarbeitung identifiziert werden. Es wurden Größenvergleichsaufgaben mit zweistelligen Ziffern, Winkelgrößen und Linienlängen durchgeführt. Bei den beiden letzten ist in jedem Fall von einer visuell-räumlichen Verarbeitungskomponente auszugehen. Die Ergebnisse stützen somit in gewisser Weise eine sich überlappende oder teilweise gemeinsame Verarbeitung numerischer als auch räumlicher Information. Wohingegen sich weiterhin die Frage ergibt, ob z.B. physikalische Größenwahrnehmungen oder Helligkeitsabstufungen auch im IPS verarbeitet werden (Dehaene 2004). In einer Studie, die diesen Ansatz verfolgt konnte eine gemeinsame rechtslateralisierte Verarbeitung im dorsalen IPS für numerische und nicht numerische Größen; wie z.B. Helligkeitsabstufungen identifiziert werden. Wobei keine spezifischen Hirnregionen für die Abschätzung von Helligkeitsstufen gefunden werden konnten. Die Abschätzung von Zahlengrößen hingegen hat zu einer spezifischen bilateralen Involvierung des anterioren IPS geführt (Vogel *et al.* 2013).

Dass ebenfalls der rechtsseitige prämotorische Kortex aktiviert ist passt zu der Annahme, dass dieser im Vergleich zum linken in höhere kognitive Lernprozesse involviert ist (Schubotz & Cramon 2003). Der rechte PMd wird als Substrat für die Verarbeitung komplexerer räumlicher Informationen und die Beibehaltung von erlernten Bewegungsabfolgen angesehen. Durch die verwendete Conjunction Analyse wird im Wesentlichen die von der symbolischen Zahlenverarbeitung abgekoppelte semantische Komponente dargestellt, die hier klar mit räumlichen Verarbeitungsmustern einhergeht. Dieses frontoparietale Aktivierungsmuster könnte Ausdruck einer erhöhten Involvierung der Arbeitsgedächtnisfunktion bzw. generell erhöhter Aufmerksamkeitsprozesse sein (Lückmann *et al.* 2014). Fakt ist jedoch, dass der IPS und hier insbesondere der HIPS die semantische Komponente der numerischen Größeneinordnung im Erwachsenenalter repräsentiert (Dehaene 2004) und hierbei insbesondere der symbolischen numerischen Information (Nieder 2004). Bei einfachen Zahlenverarbeitungsaufgaben die v.a. den Zahlenvergleich oder die Erkennung von Zahlen zum Gegenstand hatten, war der HIPS teilweise die einzige spezifisch involvierte Hirnregion (Dehaene 2004). Einige Studien konnten auch zeigen, dass weder eine Rechenleistung noch das Arbeitsgedächtnis selbst für die Deduktion numerisch bedingter parietaler Aktivierungen notwendig ist (Eger *et al.* 2003) (Naccache & Dehaene 2001). Somit ist insgesamt zwar von einer Involvierung des Arbeitsgedächtnisses in beide Aufgabensubtypen auszugehen. Allerdings war Hauptgegenstand vorliegender Arbeit, die gemeinsamen Schnittpunkte numerischer und räumlicher Verarbeitung darzustellen. Dies hat zu einem domänenübergreifenden neuronalen Aktivierungsmuster geführt, in das Areale involviert sind, die bislang u.a. eindeutig räumlichen Verarbeitungswegen zugeordnet wurden.

Eine vermehrte Aktivierung von neuronalen Netzwerken der mentalen Rotation gegenüber der Zahlenverarbeitung konnte nicht nachgewiesen werden. Die in die räumliche Verarbeitung involvierten Hirnareale stellen vielmehr eine Teilmenge der für die Zahlenverarbeitung beanspruchten dar. Die gemeinsamen Areale können somit als räumliches Substrat der Zahlenverarbeitung angesehen werden. In die Zahlenverarbeitung selbst sind noch zusätzliche neuronale Netzwerke involviert, die im Wesentlichen die linguistische Komponente als auch die Entschlüsselung der Objektidentität von Zahlen als visuelle Stimuli beinhalten. Hierbei wird sowohl der dorsale als auch der ventrale Verarbeitungsweg für visuelle Information beansprucht. Die in die Zahlenverarbeitung involvierten beschriebenen frontalen, insbesondere präfrontalen Areale, sind bislang anatomisch und auch funktionell weitgehend eher unspezifisch zugeordnet worden. Sie werden allerdings auch für prozedurale, konzeptuelle und stra-

tegische Prozesse benötigte Areale angesehen. Die starke Inkonsistenz in der Literatur bezüglich der Lateralisierung numerischer Verarbeitung und der Größenverarbeitung ist am ehesten auf die unterschiedlichen Aufgabentypen und somit unterschiedlichen Prozessaktivierungen zurückzuführen (Fias *et al.* 2003). Es wurde angenommen, dass sich die spezielle Rolle der Verarbeitung zweistelliger Zahlen auch funktionell widerspiegelt. Und die funktionellen Besonderheiten Aufschluss über die Art des Verarbeitungsprozesses geben können der hier nicht nur durch den semantischen Komplexitätszugewinn größer werdender Zahlen bedingt ist. Im Hinblick auf die Verarbeitung zweistelliger Zahlen können insbesondere die prämotorischen Areale Ausdruck einer prozeduralen Komponente sein. Im Sinne der Planung einer Ziffernabfolge beziehungsweise deren Manipulation. Dabei liegt es nahe, dass in solch einen mentalen Prozess auch Areale involviert sind, die an der Planung motorischer Bewegungsabläufe beteiligt sind, es jedoch bei der rein mentalen Manipulation einer Abfolge bleibt. Eine vermehrte Beanspruchung der Arbeitsgedächtniskomponente ist hierbei grundsätzlich ebenfalls nicht auszuschließen. Es wurde deutlich, dass zweistellige Zahlen gegenüber dreistelligen Zahlen eine vermehrte Aktivierung neuronaler Netzwerke zeigen. Interessanterweise war eine verstärkte funktionelle Aktivierung der in Anspruch genommenen Netzwerke für die erhöhte Anforderung von zwei- gegenüber einstelligen sowie drei- gegenüber einstelligen Zahlen betreffend nachweisbar. Allerdings ergab sich keine Mehraktivierung für den Kontrast, der die Verarbeitung von drei- gegenüber zweistelligen Zahlen darstellt. Bei genauerer Betrachtung der Mehraktivierung von zwei- gegenüber dreistelligen Zahlen war neben einer linksseitigen prämotorischen Aktivierung (SMA) insbesondere der linke Gyrus angularis aktiviert. Dieser stellt ein höheres Integrationszentrum für visuelle und verbale Information dar. Und er ist durch die Vernetzung mit höheren sensorischen und motorischen Arealen u.a. in Rechen-, Lese- und Schreibleistungen involviert. Insbesondere der linke Gyrus angularis wird hier als Substrat der verbalen Verarbeitungskomponente numerischer Information angesehen und ist in den u.a. für Multiplikationsaufgaben wichtigen Abruf von Faktenwissen involviert (Grabner *et al.* 2007). Dies impliziert, dass gerade die Verarbeitung von Zahlen im zweistelligen Bereich durch eine erhöhte linguistische Anforderung eine Hürde darstellt. Darüber hinaus ergab die Verarbeitung zweistelliger Zahlen gegenüber den anderen Zahlen eine verstärkte räumliche Verarbeitungskomponente im Intraparietalsulcus links. Dies konnte durch den für die mentale Rotation maskierten Kontrast der Zahlenverarbeitung gezeigt werden. Somit kann postuliert werden, dass die Ziffernumkehr im zweistelligen Bereich einer Art räumlichen Zusatzaufgabe entspricht die bei dreistelligen Zahlen weniger Gewicht hat. Dies ist ein weiterer Aspekt der die räumliche Kompetenz bezüglich der Leistung bei numerischen Aufgaben im

zweistelligen Bereich hervorhebt. Vorliegende Untersuchung wurde an einem deutschsprachigen Probandenkollektiv durchgeführt. Die Frage danach inwieweit die Sprache diese Effekte gerade im Kindesalter beeinflusst bietet eine Grundlage für Studien die dies an fremdsprachigen Kollektiven weitergehend evaluiert.

Aufgrund der Ergebnisse können relevante praxisorientierte Zusammenhänge gemacht werden. Die u.a. für schulpädagogische Strategien von Bedeutung sind. Hier ergibt sich ein interessanter Aspekt, spezifisch die Verarbeitung von zweistelligen Zahlen betreffend. Auf Verhaltensebene konnte hier ein deutlicher Performanzabfall (zunehmende Fehlerrate) dargestellt werden. Für die univariate Varianzanalyse mit „Fehlerrate-Polygone“ als abhängige Variable konnte für bestimmte Kovariaten ein statistisch signifikantes Modell errechnet werden (siehe Anhang Tab. 1). Es zeigt sich, dass die Leistung in Mathematik am stärksten die Varianz für die Fehlerrate bei den Polygonen erklärt. Nach Durchführung einer gestaffelten Regressionsanalyse mit den ausgewählten Kovariaten (siehe Anhang Tab. 2 und 3) wird Modell 2 (siehe Anhang Tab. 4) signifikant. Hieraus ist abzulesen, dass auch die Fehlerrate der zweistelligen Zahlen eine starke Korrelation mit der Performanz beim räumlichen Denken aufweist. Grundsätzlich können diese Ergebnisse mit einer generell erhöhten kognitiven Leistungsfähigkeit begründet werden. Allerdings ergaben sich für ähnliche Rechnungen mit anderen abhängigen Variablen keine signifikanten Modelle, wie es z.B. beim „Zahlenstrahl“ oder den „Problemen beim räumlichen Denken“ der Fall war. Diese unterliegen jedoch möglicherweise auch anderen Konfundierungsfaktoren, wie z.B. der Selbsteinschätzung bzw. sind sie Ausdruck einer mangelnden Vorhersagekraft der Zahlenstrahlaufgabe bezüglich der räumlich numerischen Kompetenz. In vorliegender Studie hat die Performanz der rein räumlichen Aufgabe stärker mit der Zahlenverarbeitung und der schulischen Leistung korreliert als die Zahlenstrahlaufgabe. Eine entscheidende Frage stellt sich diesbezüglich auch für die Trainierbarkeit der Performanz der Zahlenverarbeitung. Die semantische Komponente der Zahlenverarbeitung beruht auf neuronalen Netzwerken, die u.a. für die Verarbeitung räumlicher Informationen zuständig sind. Somit könnte sich die Performanz der Zahlenverarbeitung durch Trainingseinheiten steigern, die im Wesentlichen die räumliche Verarbeitung verbessern. Dies ist aktuell Gegenstand einer Studie des UKS (Das Mathemonster: fMRI-Trainingsstudie zur räumlichen Zahlenverarbeitung bei Kindern; Promotionsarbeit von Cordula Klewin). Insbesondere die Performanz im zweistelligen Bereich konnte hier durch eine Trainingseinheit verstärkt werden deren Kernaspekt die Zuordnung einer Zahl zu einer räumlichen Position war. Funktionell ergab sich der Trainingseffekt hier v.a. im PMd. Diese Ergebnisse stützen wiederum die

These des räumlichen Kernaspektes der Zahlenverarbeitung. Allerdings kann hieraus auch abgeleitet werden, dass, obwohl eine erhöhte linguistische Anforderung der Zahlenverarbeitung im zweistelligen Bereich besteht, diese über eine räumliche Aufgabe trainiert werden kann. Was wiederum auch für arithmetische Leistungen von Bedeutung sein könnte, da gerade hier und insbesondere Multiplikationsaufgaben betreffend, von einem linguistisch betonten Faktenabruf ausgegangen wird, der sich durch die verstärkte Aktivierung des Gyrus angularis ausdrückt. Somit kann von einer gegenseitigen Beeinflussung der symbolischen und nicht-symbolischen Subkomponenten ausgegangen werden. Wie es bereits durch die Trainierbarkeit des rudimentären Zahlenverständnisses durch schulische Edukation als Anhalt vorlag (Piazza *et al.* 2013).

Die gewonnenen Ergebnisse stützen die Theorie, dass es sich sowohl bei der mentalen Rotation als auch bei der Verarbeitung von Zahlensymbolen um eine auf der Extraktion der wesentlichen, für die Manipulation notwendigen Information, beruhenden Prozesse handelt. Zwar sind die Aktivierungen, gerade die der mentalen Rotation, entsprechend ihres Komplexitätszugewinnes (erhöhte Winkeldisparität) deutlicher, jedoch ist es fraglich, inwieweit hieraus eine direkte analoge Größenrepräsentation abgeleitet werden kann. Zumal gerade bei der numerischen Aufgabe deutlich wird, dass sich die Informationsextraktion aufgrund spezifischer Eigenschaften der Stimuli erschweren kann, und die zugrundeliegende Bedeutung im Sinne der semantischen Größenabbildung dieser, zunächst eine untergeordnete Rolle spielt. Da zweistellige Zahlen gegenüber dreistelligen Zahlen eine vermehrte Aktivierung neuronaler Netzwerke zeigen. Diese befanden sich u.a. in Zentren der sprachlichen Verarbeitung nämlich im Gyrus angularis links. Darüberhinaus hat die Verarbeitung zweistelliger Zahlen gegenüber den anderen Zahlen eine verstärkte räumliche Verarbeitungskomponente im Intraparietalsulcus links. Somit kann postuliert werden, dass die Ziffernumkehr selbst einer räumlichen Aufgabe entspricht die bei dreistelligen Zahlen weniger Gewicht hat. Dies hebt die räumliche Anforderung bezüglich der Leistung im zweistelligen Bereich hervor.

Beide Hypothesen konnten somit verifiziert werden. Zum einen hat sich gezeigt dass gemeinsame neuronale Aktivierungen des räumlichen Denkens und der Zahlenverarbeitung im Kindesalter vorhanden sind. Desweiteren wurde gezeigt, dass die Verarbeitung zweistelliger Zahlen eine besondere linguistische Anforderung darstellt und die hiermit verbundene mentale Ziffernumkehr als eine räumliche Zusatzaufgabe angesehen werden kann. Dies stellt insgesamt eine kognitive Hürde dar, die über den reinen semantischen Inhalt im Sinne der Zahlengröße hinausgeht.

6 Literaturverzeichnis

1. Andersen RA, Buneo CA (2002) Intentional maps in posterior parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience* 25:189-220.
2. Ansari D (2007) Does the parietal cortex distinguish between "10", "Ten" and Ten Dots. *Neuron* 53:165-167.
3. Ansari D (2008) Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience* 9:278-291.
4. Ashcraft MH (1992) Cognitive arithmetic: a review of data and theory. *Cognition* 44:75-106.
5. Baddeley A (2003a) Working memory and language: an overview. *Journal of communication disorders* 36:189-208.
6. Baddeley A (2003b) Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience* 4:829-839.
7. Benoit L, Lehalle H, Molina M, Tijus C, Jouen F (2013) Young children's mapping between arrays, number words, and digits. *Cognition* 129: 95-101.
8. Brannon EM (2002) The development of ordinal numerical knowledge in infancy. *Cognition* 83:223-240.
9. Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Seitz RJ, Zilles K, Rizzolatti G, Freund HJ (2001) Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *The European journal of neuroscience* 13:400-404.
10. Buckley PB, Gillman CB (1974) Comparisons of digits and dot patterns. *Journal of experimental psychology* 103:1131-1136.
11. Bull R, Cleland AA, Mitchell T (2013) Sex differences in the spatial representation of number. *Journal of experimental psychology* 142:181-192.
12. Cantlon JF, Brannon EM, Carter EJ, Pelphrey KA (2006) Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS biology* 4:e125.
13. Cantlon JF, Platt ML, Brannon EM (2009) Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences* 13:83-91.
14. Chan WWL, Au TK, Tang J (2011) Exploring the developmental changes in automatic two-digit number processing. *Journal of experimental child psychology* 109:263-274.

15. Cohen L, Dehaene S (1995) [Reading numbers in pure alexia: effects of the task and hemispheric specialization]. *Revue neurologique* 151:480-485.
16. Cohen L, Dehaene S (2000) Calculating without reading: unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive neuropsychology* 17:563-583.
17. Crollen V, Dormal G, Seron X, Lepore F, Collignon O (2013) Embodied numbers: the role of vision in the development of number-space interactions. *Cortex* 49:276-283.
18. Dagenbach D, McCloskey M (1992) The organization of arithmetic facts in memory: evidence from a brain-damaged patient. *Brain and Cognition* 20:345-366.
19. Dehaene S, Dupoux E, Mehler J (1990) Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance* 16:626-641.
20. Dehaene S (1992) Varieties of numerical abilities. *Cognition* 44:1-42.
21. Dehaene S, Changeux J (1993) Development of elementary numerical abilities: a neuronal model. *Journal of cognitive neuroscience* 5:390-407.
22. Dehaene S, Bossini S, Giraux P (1993) The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology* 122:371-396.
23. Dehaene S, Piazza M, Pinel P, Cohen L (2003) Three parietal circuits for number processing. *Cognitive neuropsychology* 20:487-506.
24. Dehaene S (2004) Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology* 14:218-224.
25. Dehaene S, Cohen L (2007) Cultural recycling of cortical maps. *Neuron* 56:384-98.
26. Dehaene S, Izard V, Spelke E, Pica P (2008) Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science* 320:1217-1220.
27. Dormal V, Pesenti M (2009) Common and specific contributions of the intraparietal sulci to numerosity and length processing. *Human Brain Mapping* 30:2466-2476.
28. Dum RP, Strick PL (2002) Motor areas in the frontal lobe of the primate. *Physiology & behavior* 77:677-682.
29. Dunst B, Benedek M, Bergner S, Athenstaedt U, Neubauer AC (2013) Sex differences in neural efficiency: Are they due to the stereotype threat effect? *Personality and individual differences* 55:744-749.
30. Eger E, Sterzer P, Russ MO, Giraud A, Kleinschmidt A (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron* 37:719-725.

31. Eickhoff SB, Heim S, Zilles K, Amunts K (2006) Testing anatomically specified hypotheses in functional imaging using cytoarchitectonic maps. *NeuroImage* 32:570-582.
32. Eickhoff SB, Paus T, Caspers S, Grosbras M, Evans AC, Zilles K, Amunts K (2007) Assignment of functional activations to probabilistic cytoarchitectonic areas revisited. *NeuroImage* 36:511-521.
33. Eickhoff SB, Stephan KE, Mohlberg H, Grefkes C, Fink GR, Amunts K, Zilles K (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage* 25: 1325-1335.
34. Eliot J (2002) About spatial intelligence: I. Perceptual and motor skills 94:479-486.
35. Estes Z, Felker S (2012) Confidence mediates the sex difference in mental rotation performance. *Archives of sexual behavior* 41:557-570.
36. Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G (2000) Visuomotor neurons: ambiguity of the discharge or 'motor' perception? *International journal of psychophysiology* 35:165-177.
37. Fias W, Lammertyn J, Reynvoet B, Dupont P, Orban GA (2003) Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of cognitive neuroscience* 15:47-56.
38. Fogassi L, Gallese V, Fadiga L, Luppino G, Matelli M, Rizzolatti G (1996) Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *Journal of neurophysiology* 76:141-57.
39. Fuster JM (2000) Executive frontal functions. *Experimental brain research* 133:66-70.
40. Gentilucci M, Fogassi L, Luppino G, Matelli M, Camarda R, Rizzolatti G (1988) Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. Somatotopy and the control of proximal movements. *Experimental brain research* 71:475-490.
41. Gevers W, Reynvoet B, Fias W (2003) The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition* 87:B87-95.
42. Gitelman DR, Nobre AC, Parrish TB, LaBar KS, Kim YH, Meyer JR, Mesulam M (1999) A large-scale distributed network for covert spatial attention: further anatomical delineation based on stringent behavioural and cognitive controls. *Brain* 122:1093-1106.
43. Goodale MA, Milner AD (1992) Separate visual pathways for perception and action. *Trends in neurosciences* 15:20-25.

44. Grabner RH, Ansari D, Reishofer G, Stern E, Ebner F, Neuper C (2007) Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage* 38:346-356.
45. Grevsmühl U (1995) Mathematik für Grundschullehrer: ein Fernstudienlehrgang: didaktisches Begleitheft zu E1 - E4. Deutsches Institut für Fernstudium Kapitel 4:59-78.
46. Grüßing M (2002) Wieviel Raumvorstellung braucht man für Raumvorstellungsaufgaben? Strategien von Grundschulkindern bei der Bewältigung räumlich-geometrischer Anforderungen. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik* 34:37-45.
47. Göbel S, Johansen-Berg H, Behrens T (2004) Response-selection-related parietal activation during number comparison. *Journal of Cognitive Neuroscience* 16:1536-1551.
48. Halari R, Sharma T, Hines M, Andrew C, Simmons A, Kumari V (2006) Comparable fMRI activity with differential behavioural performance on mental rotation and overt verbal fluency tasks in healthy men and women. *Experimental brain research* 169:1-14.
49. Harrington DL, Rao SM, Haal KY, Haaland KY, Bobholz JA, Mayer AR, Binderx JR, Cox RW (2000) Specialized neural systems underlying representations of sequential movements. *Journal of cognitive neuroscience* 12:56-77.
50. Harris IM, Miniussi C (2003) Parietal lobe contribution to mental rotation demonstrated with rTMS. *Journal of cognitive neuroscience* 15:315-323.
51. Haslinger B, Erhard P, Weilke F, Ceballos-Baumann AO, Bartenstein P, Einsiedel von HG, Schwaiger M, Conrad B, Boecker H (2002) The role of lateral premotor-cerebellar-parietal circuits in motor sequence control: a parametric fMRI study. *Brain research* 13:159-168.
52. Haxby JV, Horwitz B, Ungerleider LG, Maisog JM, Pietrini P, Grady CL (1994) The functional organization of human extrastriate cortex: a PET-rCBF study of selective attention to faces and locations. *The Journal of neuroscience* 14:6336-6353.
53. Hayes JR (1973). On the function of visual imagery in elementary mathematics. *Visual information processing*. New York Academic Press.
54. Heil M, Jansen-Osmann P (2008) Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: Do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *Quarterly journal of experimental psychology* 61:683-689.
55. Hellige JB (1996) Hemispheric asymmetry for visual information processing. *Acta neurobiologiae experimentalis* 56:485-497.

56. Holloway ID, Ansari D (2010) Developmental specialization in the right intraparietal sulcus for the abstract representation of numerical magnitude. *Journal of cognitive neuroscience* 22:2627-2637.
57. Viarouge A, Hubbard EM, Deheane S, Sackur J (2010). Number Line Compression and the Illusory Perception of Random Numbers, *Experimental Psychology* 57:446-454.
58. Huber S, Moeller K, Nuerk H, Willmes K (2013) A computational modeling approach on three-digit number processing. *Topics in cognitive science* 5:317-334.
59. Imbo I, Bulcke CV, de Brauwer J, Fias W (2014) Sixty-four or four-and-sixty? The influence of language and working memory on children's number transcoding, *Frontiers in Psychology* 5:1-10.
60. Ionta S, Fourkas AD, Fiorio M, Aglioti SM (2007) The influence of hands posture on mental rotation of hands and feet. *Experimental brain research* 183:1-7.
61. Jansen P, Heil M (2010) Gender differences in mental rotation across adulthood. *Experimental aging research* 36:94-104.
62. Jeannerod M (2001) Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage* 14:S103-109.
63. Jonides J, Smith EE, Koeppe RA, Awh E, Minoshima S, Mintun MA (1993). Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature* 363:623-625.
64. Jordan K, Wüstenberg T, Heinze HJ, Peters M, Jäncke L (2002) Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia* 40:2397-2408.
65. Kaufmann L, Vogel SE, Wood G, Kremser C, Schocke M, Zimmerhackl L, Koten JW (2008) A developmental fMRI study of nonsymbolic numerical and spatial processing. *Cortex* 44:376-385.
66. Kaufmann L, Vogel SE, Starke M, Kremser C, Schocke M, Wood G (2009) Developmental dyscalculia: compensatory mechanisms in left intraparietal regions in response to nonsymbolic magnitudes. *Behavioral and brain functions* 5:35.
67. Kaufmann L, Wood G, Rubinsten O, Henik A (2011) Meta-Analyses of Developmental fMRI Studies Investigating Typical and Atypical Trajectories of Number Processing and Calculation. *Developmental Neuropsychology* 36:763-787.
68. Klein E, Bahnmüller J, Mann A, Pixner S, Kaufmann L, Nuerk H, Moeller K (2013) Language influences on numerical development—Inversion effects on multi-digit number processing, *Frontiers in Psychology* 4:1-6.

69. Knops A, Nuerk H, Fimm B, Vohn R, Willmes K (2006) A special role for numbers in working memory? An fMRI study. *NeuroImage* 29:1-14.
70. Kosslyn SM, DiGirolamo GJ, Thompson WL, Alpert NM (1998) Mental rotation of objects versus hands: neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology* 35:151-161.
71. Kosslyn SM, Thompson WL, Wraga M, Alpert NM (2001) Imagining rotation by endogenous versus exogenous forces: distinct neural mechanisms. *Neuroreport* 12:2519-2525.
72. Lemer C, Dehaene S, Spelke E, Cohen L (2003) Approximate quantities and exact number words: dissociable systems. *Neuropsychologia* 41:1942-1958.
73. Liesefeld HR (2012) The mental representation in mental rotation: its content, timing, and neuronal source. Dissertation.
74. Liesefeld HR, Zimmer HD (2013) Think spatial: the representation in mental rotation is nonvisual. *Journal of experimental psychology* 39:167-182.
75. Lückmann HC, Jacobs HIL, Alex, Sack ET, Sack AT (2014) The cross-functional role of frontoparietal regions in cognition: internal attention as the overarching mechanism, *Progress in neurobiology* 116:66-86.
76. Macizo P, Herrera A (2011) Working memory and two-digit number processing. *Memory* 19:941-955.
77. Meert G, Grégoire J, Seron X, Noël M (2012) The mental representation of the magnitude of symbolic and nonsymbolic ratios in adults. *Quarterly journal of experimental psychology* 65:702-724.
78. Milivojevic B, Hamm JP, Corballis MC (2009) Functional neuroanatomy of mental rotation. *Journal of cognitive neuroscience* 21:945-959.
79. Miller K, Perlmutter M, Keating D (1984) Cognitive arithmetic: comparison of operations. *Journal of experimental psychology* 10:46-60.
80. Milner AD, Goodale MA (2008) Two visual systems reviewed. *Neuropsychologia* 46:774-785.
81. Moeller K, Huber S, Nuerk H, Willmes K (2011) Two-digit number processing: holistic, decomposed or hybrid? A computational modelling approach. *Psychological research* 75:290-306.
82. Moyer RS, Landauer TK (1967) Time required for judgements of numerical inequality. *Nature* 215:1519-1520.

83. Naccache L, Dehaene S (2001) The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cerebral cortex* 11:966-974.
84. Nieder A (2004) The Number Domain- Can we count on parietal cortex? *Neuron* 44: 407-409.
85. Nieder A, Dehaene S (2009) Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience* 32:185-208.
86. Nuerk H, Weger U, Willmes K (2005a) Language effects in magnitude comparison: small, but not irrelevant. *Brain and language* 92:262-277.
87. Nuerk H, Wood G, Willmes K (2005b) The universal SNARC effect: the association between number magnitude and space is amodal. *Experimental psychology* 52:187-194.
88. Nuerk HC, Weger U, Willmes K (2001) Decade breaks in the mental number line? Put-ting the tens and units back in different bins. *Cognition* 82:B25-33.
89. Pedersen AL (1946) A case of Gerstmann's syndrome. *Acta psychiatrica et neurologica* 21:643-54.
90. Pesenti M, Seron X, van der Linden M (1994) Selective impairment as evidence for mental organisation of arithmetical facts: BB, a case of preserved subtraction? *Cortex* 30:661-671.
91. Peters M, Battista C (2008) Applications of mental rotation figures of the Shepard and Metzler type and description of a mental rotation stimulus library. *Brain and Cognition* 66:260-264.
92. Piazza M, Pica P, Izard V, Spelke ES, Dehaene S (2013) Education enhances the activity of the nonverbal approximate number System. *Psychological science* 24: 1037-1043.
93. Piazza M, Pinel P, Le Bihan D, Dehaene S (2007) A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron* 53:293-305.
94. Pinel JPJ (2001). *Biopsychologie*. Spektrum Akademischer Verlag.
95. Pinel P, Dehaene S, Rivière D, LeBihan D (2001) Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage* 14:1013-1026.
96. Pletzer B, Kronbichler M, Nuerk H, Kerschbaum H (2013) Sex differences in the processing of global vs. local stimulus aspects in a two-digit number comparison task--an fMRI study. *PloS one* 8:e53824.

97. Podzebenko K, Egan GF, Watson JDG (2005) Real and imaginary rotary motion processing: functional parcellation of the human parietal lobe revealed by fMRI. *Journal of cognitive neuroscience* 17:24-36.
98. Quinn PC, Liben LS (2008) A sex difference in mental rotation in young infants. *Psychological science* 19:1067-1070.
99. Ratcliff G (1979) Spatial thought, mental rotation and the right cerebral hemisphere. *Neuropsychologia* 17:49-54.
100. Ratinckx E, Nuerk H, van Dijck J, Klaus W (2006) Effects of interhemispheric communication on two-digit arabic number processing. *Cortex* 42:1128-1137.
101. Repovs G, Baddeley A (2006) The multi-component model of working memory: explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience* 139:5-21.
102. Rosselli M, Ardila A, Matute E, Inozemtseva O (2009) Gender differences and cognitive correlates of mathematical skills in school-aged children. *Child neuropsychology* 15:216-231.
103. Sadato N, Campbell G, Ibáñez V, Deiber M, Hallett M (1996) Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements., *The Journal of neuroscience* 16:2691-2700.
104. Salway AF, Logie RH (1995) Visuospatial working memory, movement control and executive demands. *British journal of psychology* 86:253-269.
105. Schneider F, Fink G (2013) *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*. Springer, Berlin Heidelberg
106. Schubotz RI, Cramon von DY (2003) Functional-anatomical concepts of human premotor cortex: evidence from fMRI and PET studies. *NeuroImage* 20:S120-31.
107. Semrud-Clikeman M, Fine JG, Bledsoe J, Zhu DC (2012) Gender differences in brain activation on a mental rotation task. *The International journal of neuroscience* 122: 590-597.
108. Shepard RN, Cooper LA (1982) *Mental images and their transformations*. The MIT Press.
109. Shepard RN, Metzler J (1971) Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 171:701-703.
110. Shuman M, Kanwisher N (2004) Numerical magnitude in the human parietal lobe; tests of representational generality and domain specificity. *Neuron* 44:557-569.
111. Starkey P, Cooper RG Jr (1980) Perception of numbers by human infants. *Science* 210:1033-1035.

- 112.Takano Y (1989) Perception of rotated forms: a theory of information types. *Cognitive psychology* 21:1-59.
- 113.Thompson JM, Nuerk H, Moeller K, Kadosh RC (2013) The link between mental rotation ability and basic numerical representations, *Acta Psychologica* 144:324-331.
- 114.Trojano L, Grossi D, Linden DEJ, Formisano E, Goebel R, Cirillo S, Elefante R, & Di Salle F (2002) Coordinate and categorical judgements in spatial imagery. An fMRI study. *Neuropsychologia* 40:1666-1674.
- 115.Tzuriel D, Egozi G (2010) Gender differences in spatial ability of young children: the effects of training and processing strategies. *Child development* 81:1417-1430.
- 116.Vanderplas JM, Garvin EA (1959) The association value of random shapes. *Journal of experimental psychology* 57:147-154.
- 117.Ventre-Dominey J, Bailly A, Lavenne F, Lebars D, Mollion H, Costes N, Dominey PF (2005) Double dissociation in neural correlates of visual working memory: a PET study. *Cognitive brain research* 25:747-759.
- 118.Verguts T, de Moor W (2005) Two-digit comparison: decomposed, holistic, or hybrid? *Experimental psychology* 52:195-200.
- 119.Vogel SE, Rol, Grabner H, Schneider M, Siegler RS, Ansari D, Grabner RH (2013) Overlapping and distinct brain regions involved in estimating the spatial position of numerical and non-numerical magnitudes: An fMRI study. *Neuropsychologia* 51:979-989.
- 120.Wood G, Nuerk H, Willmes K (2006a) Crossed hands and the SNARC effect: a failure to replicate Dehaene, Bossini and Giraux (1993). *Cortex* 42:1069-1079
- 121.Wood G, Nuerk H, Willmes K (2006b) Neural representations of two-digit numbers: a parametric fMRI study. *NeuroImage* 29:358-367.
- 122.Wraga M, Thompson WL, Alpert NM, Kosslyn SM (2003) Implicit transfer of motor strategies in mental rotation. *Brain and Cognition* 52:135-143.
- 123.Wynn K, Bloom P, Chiang W (2002) Enumeration of collective entities by 5-month-old infants. *Cognition* 83:B55-62.
- 124.Zacks JM (2008) Neuroimaging studies of mental rotation: a meta-analysis and review. *Journal of cognitive neuroscience* 20:1-19.
- 125.Zacks JM, Michelon P (2005) Transformations of visuospatial images. *Behavioral and cognitive neuroscience reviews* 4:96-118.
- 126.de Renzi E, Nichelli P (1975) Verbal and non-verbal short-term memory impairment following hemispheric damage. *Cortex* 11:341-54.

127. van Harskamp NJ, Cipolotti L (2001) Selective impairments for addition, subtraction and multiplication. Implications for the organisation of arithmetical facts. *Cortex* 37: 363-88.
128. van der Ham IJM, Raemaekers M, van Wezel RJA, Oleksiak A, Postma A (2009) Categorical and coordinate spatial relations in working memory: an fMRI study. *Brain Research* 1297:70-7

7 Publikation

Christoph Krick, Sonja Kreis, Frank Paulus, Wolfgang Reith, Aus Bildung und Wissenschaft;
Zur Biologie der Mathematik (2013), MNU 66/2, Seiten 68-75, ISSN 0025-5866, Verlag
Klaus Seeberger, Neuss

8 Anhang

Varianzanalysen der behavioralen Daten

Tab. 1 : Univariate Varianzanalyse mit der Fehlerrate der Mentalen Rotation als abhängige Variable

Tests der Zwischensubjekteffekte					
Abhängige Variable: Fehler Polygone					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	993,263 ^a	4	248,316	3,178	,024
Konstanter Term	,081	1	,081	,001	,975
ErrZ099	177,152	1	177,152	2,267	,141
RDenken	34,905	1	34,905	,447	,508
Zahlenstrahl	30,576	1	30,576	,391	,535
NoteMathe	324,349	1	324,349	4,151	,049
Fehler	2891,142	37	78,139		
Gesamt	11977,000	42			
Korrigierte Gesamtvariation	3884,405	41			
a. R-Quadrat = ,256 (korrigiertes R-Quadrat = ,175)					

Tab. 2: Aufgenommene Variablen für die Regressionsanalyse mit der Fehlerrate der Mentalen Rotation als abhängige Variable

Aufgenommene/Entfernte Variablen ^a			
Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	Zeugnis Mathe ^b	.	Einschluß
2	Fehler zweistellige Zahl ^b	.	Einschluß
3	Probleme räumliches Denken ^b	.	Einschluß
4	Zahlenstrahl ^b	.	Einschluß
a. Abhängige Variable: Fehler Polygone			
b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.			

Tab. 3 : Modellzusammenfassung für die Regressionsanalyse mit der Fehlerrate der Mentalen Rotation als abhängige Variable

Modellzusammenfassung				
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,412 ^a	,170	,149	8,97861
2	,484 ^b	,234	,195	8,73371
3	,498 ^c	,248	,188	8,76854
4	,506 ^d	,256	,175	8,83962
a. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe				
b. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe, Fehler zweistellige Zahl				
c. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe, Fehler zweistellige Zahl, Probleme räumliches Denken				
d. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe, Fehler zweistellige Zahl, Probleme räumliches Denken, Zahlenstrahl				

Tab. 4 : Gestaffelte Regressionsanalyse für die Zusammenhänge der univariaten Varianzanalyse mit den ausgewählten Einflussvariablen

ANOVA ^a						
Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	659,787	1	659,787	8,184	,007 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	3224,617	40	80,615		
	Gesamt	3884,405	41			
2	Regression	909,572	2	454,786	5,962	,006 ^c
	Nicht standardisierte Residuen	2974,833	39	76,278		
	Gesamt	3884,405	41			
3	Regression	962,687	3	320,896	4,174	,012 ^d
	Nicht standardisierte Residuen	2921,717	38	76,887		
	Gesamt	3884,405	41			
4	Regression	993,263	4	248,316	3,178	,024 ^e
	Nicht standardisierte Residuen	2891,142	37	78,139		
	Gesamt	3884,405	41			
a. Abhängige Variable: Fehler Polygone						

b. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe
c. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe, Fehler zweistellige Zahl
d. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe, Fehler zweistellige Zahl, Probleme räumliches Denken
e. Einflußvariablen : (Konstante), Zeugnis Mathe, Fehler zweistellige Zahl, Probleme räumliches Denken, Zahlenstrahl

Geschlechtereffekte der behavioralen Daten

Tab. 5 : Mann-Whitney Test - behaviorale Daten der fMRT-Messung

Statistik für Test ^a				
	Fehler Zahlen	Fehler Polygone	Mittel RT Zahlen	Mittel RT Polygone
Mann-Whitney-U	148,500	191,500	202,000	214,000
Wilcoxon-W	401,500	444,500	455,000	467,000
Z	-1,807	-,719	-,453	-,151
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,071	,472	,650	,880

a. Gruppenvariable: Geschlecht

Tab. 6 : Mann-Whitney Test - Daten der Fragebogenerhebung für Verhaltensauffälligkeiten und psychische Probleme

Statistik für Test ^a			
	Verhaltensprobleme	Aufmerksamkeitsprobleme (Score)	Depressive Verstimmung (Score)
Mann-Whitney-U	206,500	211,000	207,000
Wilcoxon-W	459,500	464,000	460,000
Z	-,341	-,230	-,345
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,733	,818	,730

a. Gruppenvariable: Geschlecht

Tab. 7 : Mann-Withney Test - Daten der Fragebogenerhebung für räumliches Denken und schulische Leistungen

Statistik für Test ^a					
	Zeugnis Mathe	Zeugnis Deutsch	Probleme mit Mathe (Score)	Probleme räumliches Denken	Zahlenstrahl
Mann-Whitney-U	184,000	203,500	105,000	180,500	186,500
Wilcoxon-W	437,000	413,500	358,000	433,500	439,500
Z	-,958	-,443	-2,904	-1,003	-,844
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,338	,658	,004	,316	,399

a. Gruppenvariable: Geschlecht

Tab. 8 : Eingeschlossene behaviorale Daten

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten	
	Funktion
	1
Zeugnis Mathe	-,131
Zeugnis Deutsch	-,309
Probleme mit Mathe (Score)	,943
Verhaltensprobleme	-,524
Aufmerksamkeitsprobleme (Score)	-,105
Depressive Verstimmung (Score)	-,237
Zahlenstrahl	,181
Probleme räumliches Denken	,550
RT_Z009	-1,386
RT_Z099	,433
RT_Z999	,748
RT_P000	,137
RT_P060	-,355
RT_P120	1,021
Fehler einstellige Zahl	,617
Fehler zweistellige Zahl	,157
Fehler dreistellige Zahl	,025
Fehler nicht-rotiert	-,806
Fehler 60° rotiert	,747
Fehler 120° rotiert	-,042

Zusammenfassung der kanonischen Diskriminanzfunktionen

Tab. 9 :

Eigenwerte				
Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation
1	,864 ^a	100,0	100,0	,681

a. Die ersten 1 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden in dieser Analyse verwendet.

Tab. 10 :

Wilks' Lambda				
Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	,537	18,675	20	,543

Fragebogen für Schüler zum Thema Raum/Zahl/Mathematik

Datum:

Name: Vorname:

Ich bin ein Mädchen ☐ / ein Junge ☐

Geburtsdatum: Klasse:

Schule:

Info: Der Fragebogen beinhaltet unterschiedliche Fragetypen. Deshalb gibt es für jeden Teil eine eigene Art, die Fragen zu beantworten. Wie genau du antworten sollst, wird jeweils erklärt.

Dieses Deckblatt wird nachher vom übrigen Fragebogen getrennt, damit niemand sehen kann, zu wem die nächstfolgenden Angaben gehören. Daher kannst du ganz ehrlich antworten.

Der Fragebogen bekommt nur eine anonyme Nummer, die keinen Rückschluss auf deine Person zulässt. Diese Nummer wird von uns per Zufall erfunden.

Nummer des Fragebogens:

Kürzel des Datensatzes:

Nummer des Fragebogens: (dient der Anonymisierung)

Bitte nenne uns deine Noten, die du im letzten Jahreszeugnis in Mathe und Deutsch bekommen hast! – Diese und alle folgenden Angaben werden NICHT an andere Menschen weitergegeben!

Ich hatte im letzten Jahreszeugnis in Mathe eine: _____

Ich hatte im letzten Jahreszeugnis in Deutsch eine: _____

Jetzt folgt eine Liste von Eigenschaften und Verhaltensweisen, die bei Jugendlichen auftreten können. Nach jeder Eigenschaft findest du die Ziffern 0,1,2. Bei jeder Eigenschaft, die für dich jetzt oder in den letzten sechs Monaten genau so oder häufig zutrifft, kreuzt du bitte die Ziffer 2 an. Wenn die Eigenschaft etwas oder manchmal zutrifft, kreuzt du bitte die Ziffer 1 an, und wenn sie für dich nicht zutrifft, die Ziffer 0. Beantworte bitte alle Fragen so gut du kannst, auch wenn dir einige unpassend erscheinen.

0= nicht zutreffend 1=etwas oder manchmal zutreffend 2=genau oder häufig zutreffend

Ich verhalte mich zu jung für mein Alter 0 1 2

Ich habe Schwierigkeiten mich zu konzentrieren
oder länger aufzupassen 0 1 2

Ich kann nicht lange stillsitzen..... 0 1 2

Ich fühle mich einsam 0 1 2

Ich bin durcheinander oder zerstreut..... 0 1 2

Ich weine viel 0 1 2

0= nicht zutreffend 1=etwas oder manchmal zutreffend 2=genau oder häufig zutreffen

Ich bin tagsüber verträumt oder in Gedanken.....	0	1	2
Ich habe mich absichtlich verletzt oder versucht mich umzubringen	0	1	2
Ich habe Angst, etwas Schlimmes zu denken oder zu tun	0	1	2
Ich glaube, ich muss perfekt sein und alles gut können.....	0	1	2
Ich glaube, dass mich niemand mag.....	0	1	2
Ich glaube, dass andere mir etwas antun wollen.....	0	1	2
Ich fühle mich wertlos oder unterlegen	0	1	2
Ich tue etwas, ohne zu überlegen	0	1	2
Ich bin nervös, reizbar oder angespannt	0	1	2
Ich bin zu furchtsam oder zu ängstlich	0	1	2
Ich habe starke Schuldgefühle.....	0	1	2
Ich bin schlecht in der Schule	0	1	2
Ich bin unbeholfen oder schwerfällig	0	1	2
Ich bin befangen oder werde leicht verlegen	0	1	2
Ich bin misstrauisch.....	0	1	2
Ich denke darüber nach, mich umzubringen	0	1	2
Ich bin unglücklich, traurig oder niedergeschlagen	0	1	2
Ich mache mir viele Sorgen	0	1	2

Jetzt kommen einige Fragen, bei denen es um deine Erfahrungen mit Mathematik geht. Hierbei gibt es keine richtigen und falschen Antworten. Bitte antworte ehrlich und kreuze die Antwort an, die am besten auf dich zutrifft! Kreuze dafür jeweils die passende Ziffer an. Auch wenn du dir nicht sicher bist, kreuze trotzdem die Ziffer an, die am besten auf dich zutrifft!

0 = trifft überhaupt nicht zu

1 = trifft kaum oder selten zu

2 = trifft in etwa oder manchmal zu

3 = trifft vollkommen oder häufig zu

Den am Tag zuvor gelernten/und richtig angewandten Mathestoff habe ich am Tag darauf wieder vergessen.	0	1	2	3
Meine Noten in den Matheschulaufgaben variieren sehr stark. Gute Noten wechseln sich mit ungenügenden ab.	0	1	2	3
Bei Sach-/Textaufgaben weiß ich nicht, welchen Rechenweg ich anwenden soll.	0	1	2	3
Mir machen Klassenarbeiten in Mathematik Spaß.	0	1	2	3
Vor einer Matheschulaufgabe denke ich, dass ich gut abschneiden werde.	0	1	2	3
Vor einer Mathearbeit geht es mir nicht gut, ich bekomme z.B. Bauchweh, Kopfschmerzen oder Durchfall.	0	1	2	3
Ich versuche mich so wenig wie möglich mit Mathematik zu beschäftigen.	0	1	2	3
Ich denke, dass ich nicht gut im Rechnen bin.	0	1	2	3
Ich habe Angst vor Mathetests und denke, dass ich schlecht abschneiden werde.	0	1	2	3
Ich fühle mich von den Anforderungen der Mathetests überfordert.	0	1	2	3
Ich beschäftige mich über die Hausaufgaben hinaus mit Mathematik.	0	1	2	3
Ich finde die Aufgaben der Mathetests zu einfach.	0	1	2	3

Jetzt noch ein paar speziellere Fragen, die nicht unbedingt auf dich zutreffen müssen! Bitte kreuze jeweils „Ja“ oder „Nein“ an! Bitte antworte auch hier wieder ehrlich!

Wurdest du schon einmal gesondert bezüglich deiner Fähigkeiten in Mathe untersucht? Also unabhängig von deinen Klassenkameraden und den normalen Schularbeiten?	Ja	Nein
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	------

Falls du „Ja“ angekreuzt hast, dann beantworte bitte folgende Fragen!

Wurde dabei ein Ergebnis erzielt und festgestellt, dass du im Vergleich zu anderen Kindern <u>stärkere Probleme</u> mit Mathe hast?	Ja	Nein
Wurde dabei ein Ergebnis erzielt und festgestellt, dass du es im Vergleich zu anderen Kindern <u>leichter</u> in Mathe hast?	Ja	Nein

Nun folgen noch fünf kurze Rechenaufgaben. Du sollst beurteilen bei welchen der Aufgaben du deiner Meinung nach mit einer schriftlichen Lösung schneller wärst als mit dem Kopfrechnen. Schau dir dafür zunächst jede Aufgabe genau an und antworte auch hier wieder ehrlich! Wähle bitte die Antwort, die am besten passt und mache bei jeder Aufgabe ein Kreuz!

Kreuze die Ziffer 1 an, wenn du die Aufgabe im Kopf lösen würdest, und kreuze die Ziffer 2 an, wenn du die Aufgabe schriftlich lösen würdest.

1= ich würde die Aufgabe im Kopf lösen

2= ich würde die Aufgabe schriftlich lösen

$? - 28 = 27$	1	2
$78 - 29 = ?$	1	2
$238 - 146 = ?$	1	2
$300,04 \times 100 = ?$	1	2
$75\text{m} = ?\text{km}$	1	2

Danke, dass du die Fragen beantwortet hast!

Jetzt kommen noch ein paar Aufgaben, die anders sind als die gerade eben. Bei ihnen ist vor allem deine Vorstellungskraft gefragt! Viel Spaß!

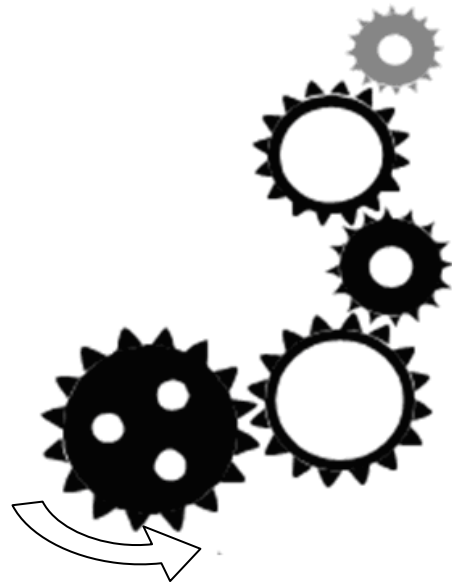
Bitte markiere, in welche Richtung sich das **graue** Zahnrad dreht!

Der Pfeil gibt dir an, in welche Richtung sich das erste Zahnrad am anderen Ende der Reihe dreht. Die Räder dazwischen können sich in verschiedene Richtungen drehen!

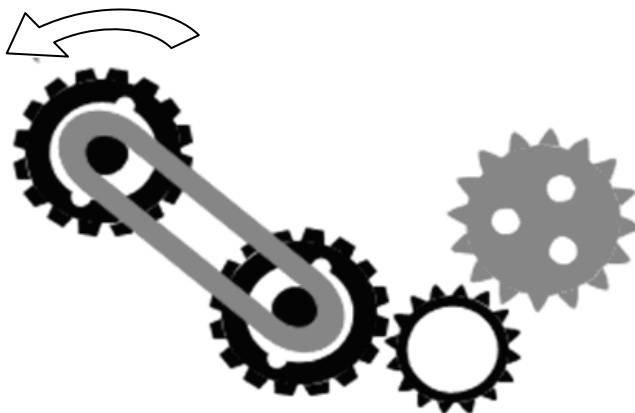
Das graue Zahnrad dreht sich nach:



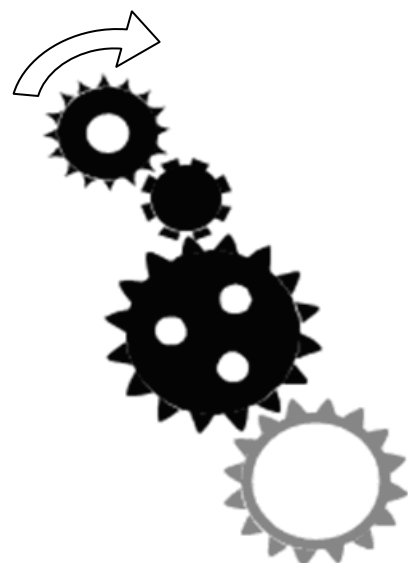
links: ☐ rechts: ☐



links: ☐ rechts: ☐

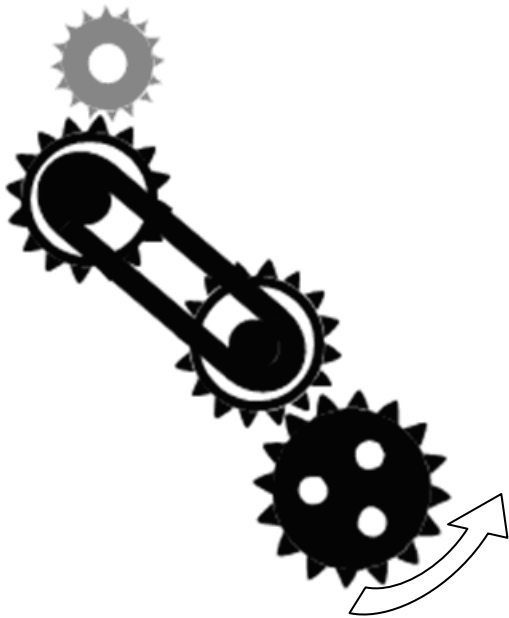


links: ☐ rechts: ☐



links: ☐ rechts: ☐

Das graue Zahnrad dreht sich nach:

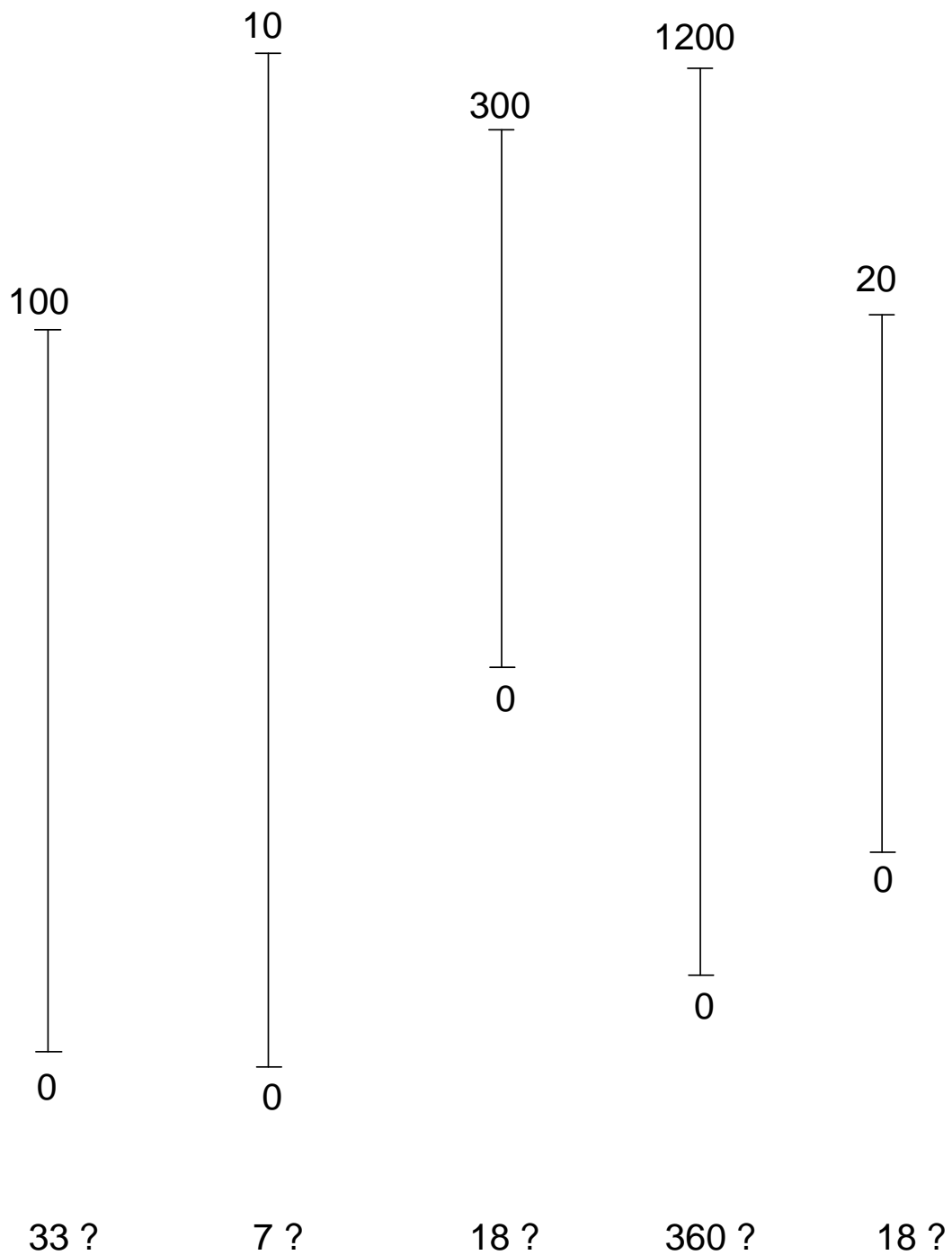


links: ☐ rechts: ☐

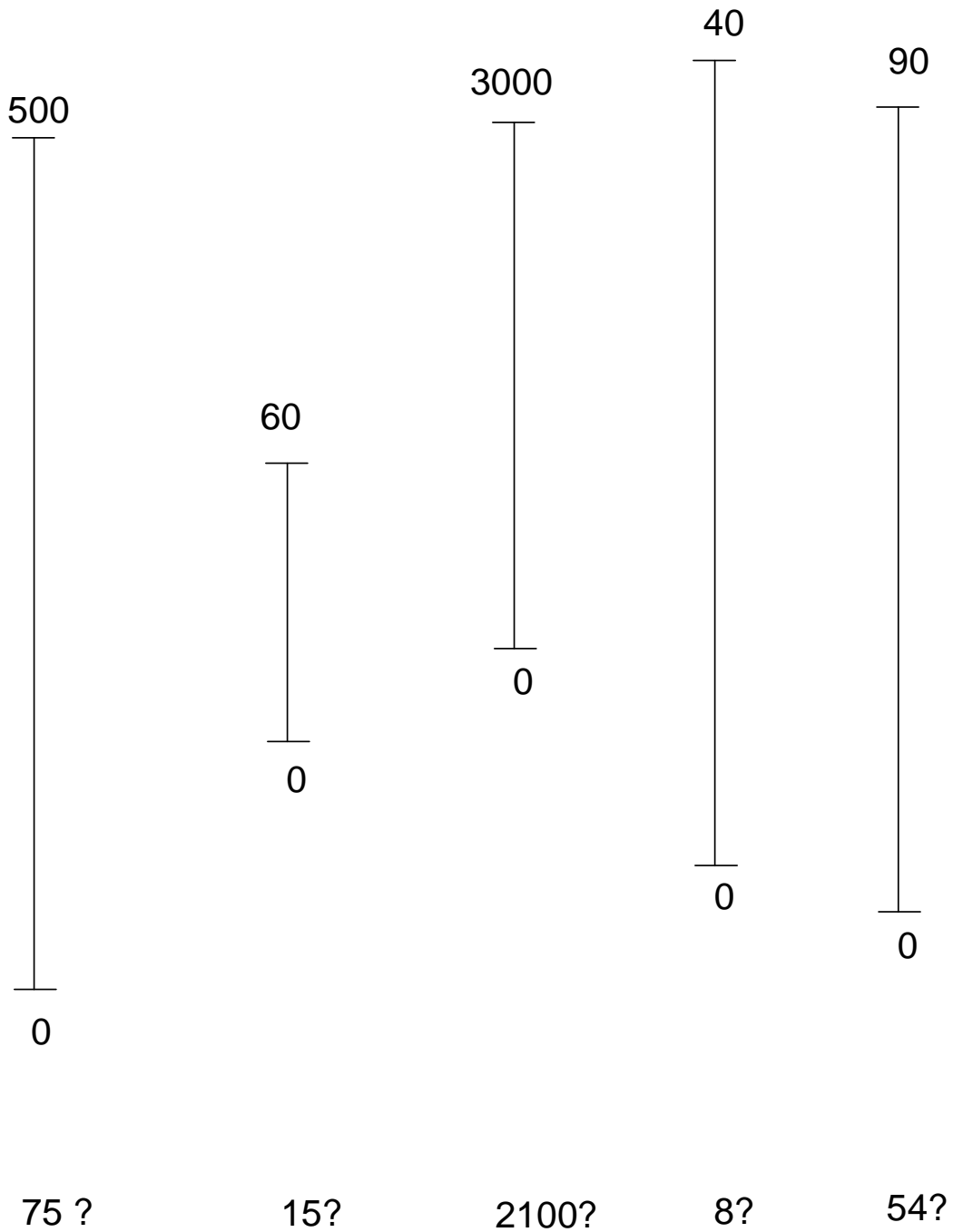


links: ☐ rechts: ☐

Und weiter geht es mit einer anderen kleinen Knobelaufgabe auf der nächsten Seite...



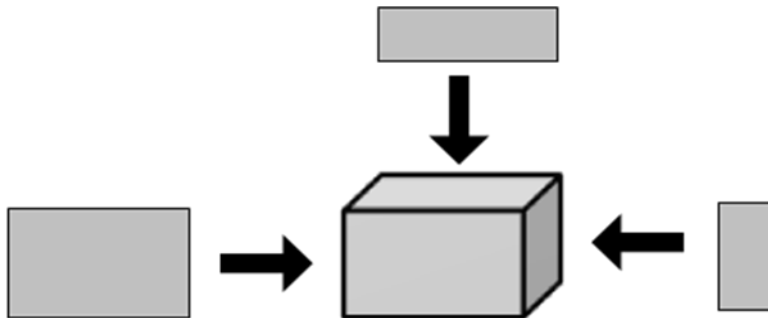
Bitte markiere mit einem kleinen, waagerechten Strich die Stelle an dem jeweiligen Zahlenstrahl, wo sich die darunter stehende Zahl von der Größe her befinden müsste.



Bitte markiere mit einem kleinen, waagerechten Strich die Stelle an dem jeweiligen Zahlenstrahl, wo sich die darunter stehende Zahl von der Größe her befinden müsste.

Bei dieser Aufgabe geht es darum, sich die Schachteln von der richtigen Seite vorzustellen! Die Schachteln sind alle gleich groß, **unabhängig** von ihrer Farbe!

Damit du es dir besser vorstellen kannst, siehst du hier, wie eine Schachtel von allen Seiten aussehen würde:

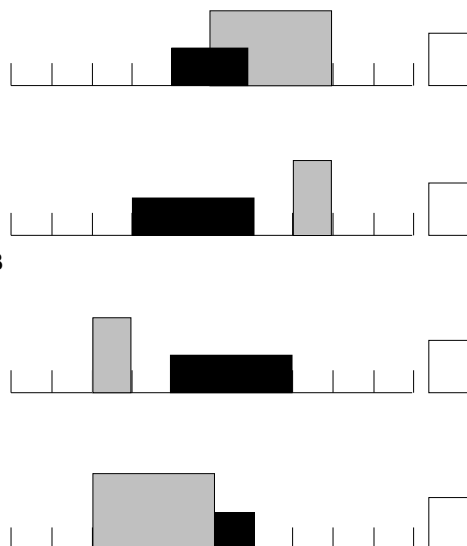
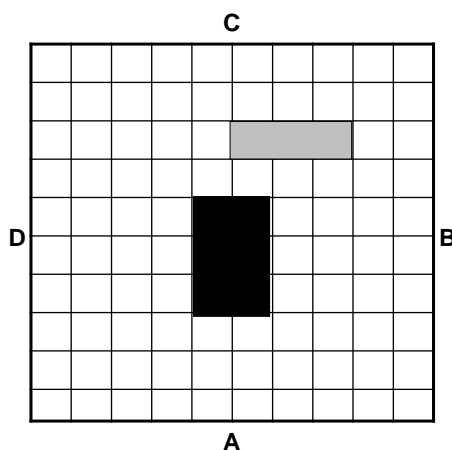


In diesem Fall geht es auch um die **Zeit**, die du für die **vier** Schachtel-Aufgaben benötigst. Schau also mal auf die Uhr und schreibe die aktuelle Zeit hier auf:

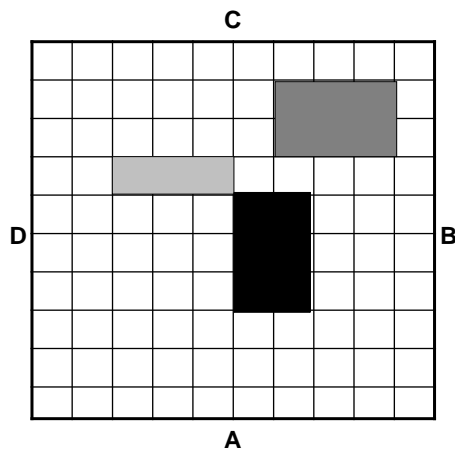
Es ist genau Uhr. – Und jetzt auf die Plätze, fertig, los...!

Hier siehst du gleich große Schachteln von oben.

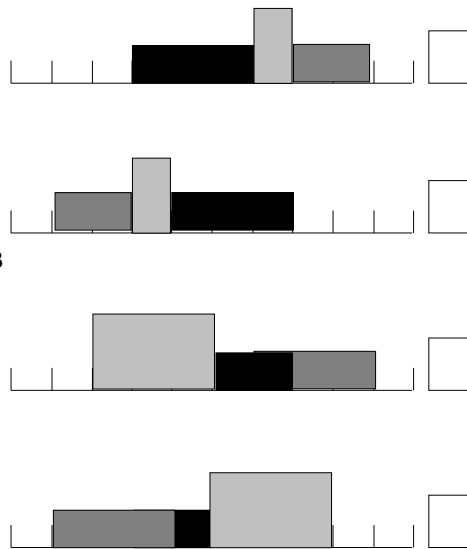
Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du die Schachteln genau so wie unten gemalt?



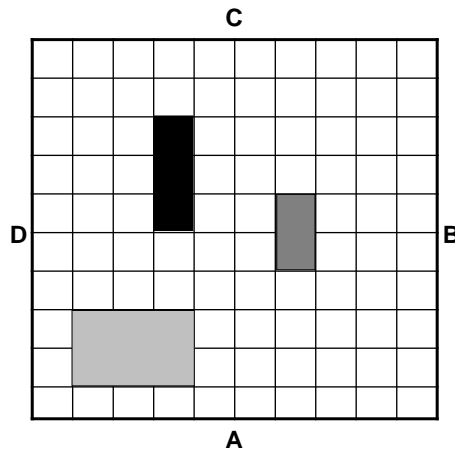
Hier siehst du gleich große
Schachteln von oben.



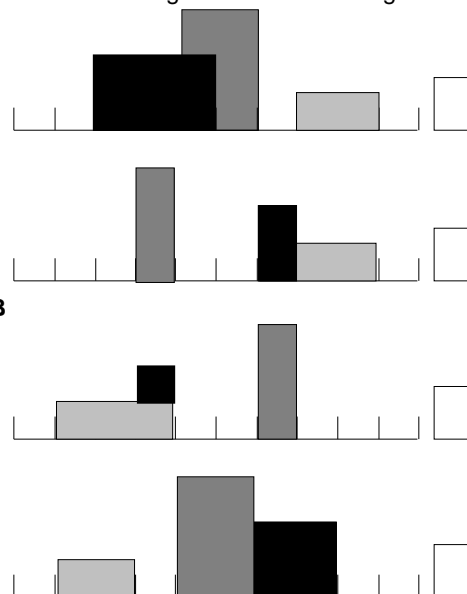
Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du
die Schachteln genau so wie unten gemalt?



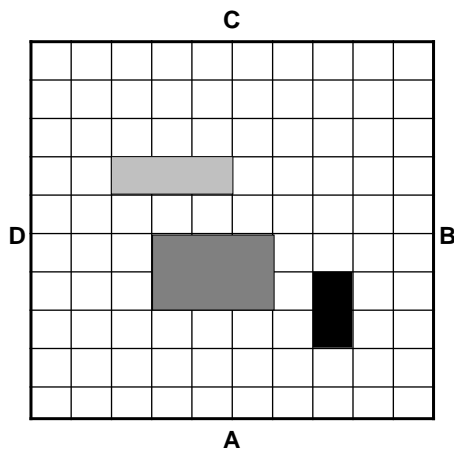
Hier siehst du gleich große
Schachteln von oben.



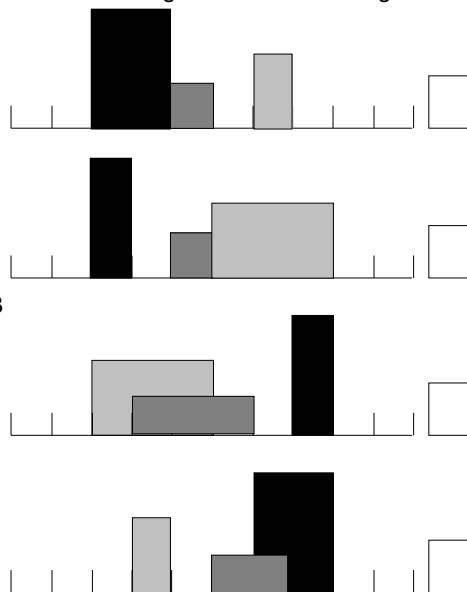
Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du
die Schachteln genau so wie unten gemalt?



Hier siehst du gleich große Schachteln von oben.



Von welcher Seite (A, B, C oder D) siehst du die Schachteln genau so wie unten gemalt?



Fertig mit den vier Schachtel-Aufgaben? – Dann schreibe hier wieder die aktuelle Zeit hin:

Es ist jetzt Uhr.

Wenn du magst, kannst du gerne auch die Zeit ausrechnen, die du für die Schachtel-Aufgabe benötigt hast:

Ich habe Minuten gebraucht.

Zum Schluss würden wir gerne noch wissen, wie du selbst deine Bearbeitung des Fragebogens einschätzt. Bitte kreuze jeweils „Ja“ oder „Nein“ an!

Ich habe mich bei der Bearbeitung des Fragebogens angestrengt und versucht, ihn so gut wie möglich zu bearbeiten.	Ja	Nein
Ich hätte mich mehr angestrengt, wenn ich dafür benotet worden wäre.	Ja	Nein
Ich war besonders aufgeregt bei den Aufgaben zum Vorstellungsvermögen.	Ja	Nein

Vielen Dank für deine Mitarbeit!

